

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einführung	3
2 Vorbetrachtungen	4
2.1 Technische Keramik	4
2.1.1 Zum Begriff der Keramik und charakteristische Eigenschaften	4
2.1.2 Herstellung von Al_2O_3 -Keramik	4
2.1.3 Fügen von Al_2O_3 -Keramik	5
2.1.4 Problembeschreibung	5
2.1.5 Stand der Technik	7
2.2 Aufgabenstellung	8
3 Verwendete Materialien	9
3.1 Haupteigenschaften der Keramiken	9
3.2 EDX-Analyse	11
3.3 REM-Analyse	15
4 Technische Ausrüstung	17
4.1 Laseranlage	17
4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Faserlasers	17
4.1.2 Kenndaten von Anlage und Strahlquelle	18
4.1.3 Scannersystem	19
4.2 Messtechnik	21
4.2.1 EDX- und REM-Analyse	21
4.2.2 Prüfmaschine Zwick	21
4.2.3 Digitales Lichtmikroskop	23
4.2.4 Probenpreparation	23
5 Experimenteller Teil	24
5.1 Blindschweißungen	24
5.1.1 Versuchsaufbau	24
5.1.2 Untersuchte Parameter	24
5.1.3 Zusammenfassung der Versuchsreihen	40
5.2 Schweißungen von Winkelgeometrien	41
5.2.1 Versuchsaufbau	41
5.2.2 Untersuchte Parameter	42
5.2.3 Auswertung der Winkel	43
5.3 Schweißungen im Stumpfstoß	48
5.3.1 Versuchsaufbau	48

5.3.2	Schweißvorrichtung	49
5.3.3	Untersuchte Parameter.....	50
5.3.4	Auswertung der Schweißnähte	57
6	Zusammenfassung und Ausblick	59
7	Anhang	60
8	Literaturverzeichnis	64
9	Erklärung.....	66

1 Einführung

Keramische Werkstoffe finden auf Grund ihrer speziellen physikalischen und chemischen Eigenschaften in zahlreichen Gebieten der Technik Einsatz. Ob im Automobil- und Maschinenbau, in der Medizintechnik, der Lebensmittel- und Pharmaindustrie, der Luft- und Raumfahrttechnik oder der chemischen Industrie, Keramik ist aus vielen Branchen nicht mehr weg zu denken.

Die Besonderheit keramischer Werkstoffe liegt in ihren Eigenschaften. Sie vereinen hohe Härte und Verschleißfestigkeit mit vergleichsweise geringer Dichte, was sie zu einer interessanten Alternative zu Metallen macht. Heutzutage werden Bauteile, die großen Kräften ausgesetzt sind oder einen hohen Verschleiß aufweisen, häufig aus Oxidkeramiken gefertigt, wie beispielsweise Transportrinnen, Trommelmühlen und Betonmischer.

Die chemische Resistenz und Hochtemperaturbeständigkeit des Materials eröffnen weiterhin eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, für die Metalle nicht einsetzbar sind. Dazu gehören beispielsweise Rohrleitungen und Ringdichtungen in der chemischen Industrie, die zudem beständig gegen Metallschmelzen und viele Gläser und Schlacken sein müssen.¹

Den zahlreichen Vorteilen durch die bei der Herstellung gezielt steuerbaren Eigenschaften, stehen jedoch auch Nachteile gegenüber, die die Entwicklung und den Einsatz von Keramiken begrenzen. Insbesondere die geometrische Vielfalt wird durch das schwer beherrschbare Schwindungsverhalten bei der Herstellung keramischer Körper beschränkt. Aus diesem Grund sind geometrisch aufwendige Keramikteile nur begrenzt erzeugbar und mit hohen Kosten verbunden. Das Fügen keramischer Werkstoffe erhält unter diesem Blickwinkel eine besondere Bedeutung. Allerdings besteht dabei der Anspruch, eine Festigkeit der Verbindung zu erreichen, die in der Größenordnung des Grundmaterials liegt. Mit den Fügeverfahren Kleben oder Löten kann diese Festigkeit, die zu den erwünschten Eigenschaften des Werkstoffs zählt, nicht erreicht werden.

Bereits im Jahr 1996 wurden am Laserinstitut Mittelsachsen e. V. in einem Verbundprojekt Untersuchungen zum Schweißen von Keramik mittels Laserstrahlung durchgeführt. Das dabei entwickelte Verfahren des Zweistrahlenschweißens von Aluminiumoxidkeramik ermöglichte das Fügen von Keramik in verschiedenen Geometrien ohne gravierende Einbußen der gewünschten Eigenschaften, indem der Werkstoff durch einen Laserstrahl gezielt vorgeheizt wurde und der zweite Strahl die Schweißnaht erzeugte.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, zu untersuchen inwiefern das Laserstrahlenschweißen von Aluminiumoxidkeramik mit nur einem Laser möglich ist. Dabei kommt ein Ytterbium-dotierter Monomode Faserlaser zum Einsatz, dessen hohe Strahlqualität eine sehr gute Fokussierbarkeit garantiert. Die Hauptaufgabe besteht darin, zu prüfen, ob durch diesen lokal extrem begrenzten Energieeintrag die Möglichkeit des rissfreien Schweißens mit nur einem Laser und ohne Vorheizprozess möglich ist.

¹ BARGEL, H. J.: Werkstoffkunde, S. 312

2 Vorbetrachtungen

2.1 Technische Keramik

2.1.1 Zum Begriff der Keramik und charakteristische Eigenschaften

Es gibt zahlreiche Definitionen für den Begriff „Keramik“. Laut Hennicke (HENNICKE, 1967) sind „keramische Werkstoffe [...] anorganisch, nichtmetallisch, in Wasser schwer löslich und zu wenigstens 30% kristallin. In der Regel werden sie bei Raumtemperatur aus einer Rohmasse geformt und erhalten ihre typischen Werkstoffeigenschaften durch eine Temperaturbehandlung, meist über 800°C. Gelegentlich geschieht die Formgebung auch bei erhöhter Temperatur oder gar über den Schmelzfluß mit anschließender Kristallisation.“

Laut Nagel (NAGEL, 1999) werden Werkstoffe und Bauteile als Keramik bezeichnet, die mit einem bestimmten Verfahren erzeugt werden. Dabei wird anorganisches Material in Pulverform durch verschiedene Prozesse in die gewünschte Form gebracht und im Anschluss daran durch einen Sinterprozess verfestigt und gegebenenfalls endbearbeitet. Prinzipiell schließt diese Art der Herstellung auch Werkstoffe auf Basis von Metalloxiden ein, allerdings werden diese in der Regel dem Begriff der Pulvermetallurgie zugeordnet und nicht zu den Keramiken gezählt.

Eine gängige Einteilung keramischer Werkstoffe findet nach ihren Inhaltsstoffen statt, so unterscheidet man drei Hauptgruppen: Silikat-, Oxid- und Nichtoxidkeramiken.² Im Rahmen dieser Arbeit wird Aluminiumoxidkeramik als Vertreter der oxidischen Keramiken verwendet.

Als hervorzuhebende Eigenschaften, verglichen mit Metallen und organischen Stoffen, besitzt Aluminiumoxidkeramik eine hohe Härte, Verschleiß- und Druckfestigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit, hohe Biegefestigkeit, hohe chemische und oxidative Resistenz und einen hohen elektrischen Widerstand.³ Die besten Eigenschaftswerte sind laut Bergmann (BERGMANN, 2003/2005) dabei bei einer möglichst reinen, feinkörnigen, porenarmen und damit dichten Al_2O_3 -Keramik zu erwarten.

Hervorzuheben ist, dass die genannten Eigenschaften von Aluminiumoxidkeramik über einen großen Temperaturbereich praktisch konstant sind.

Die Entwicklung von sogenannten Hochleistungskeramiken mit definierten mechanischen, thermischen, chemischen, elektrischen und biologischen Eigenschaften hat seit etwa 1970 in zahlreichen Industriezweigen zu großen technologischen Fortschritten geführt.⁴

2.1.2 Herstellung von Al_2O_3 -Keramik

Bargel (BARGEL, 2004) unterteilt die Herstellung von Keramiken in drei Stufen: das Aufbereiten und Mischen der Pulver, das Herstellen der Formteile und schließlich das Sintern bzw. Brennen.

Beim Aufbereiten der Pulver unterscheidet man zwischen natürlichen und synthetischen Rohstoffen. Synthetische Herstellung ist meist dann notwendig, wenn nur geringe Toleranzen gegenüber den gewünschten Eigenschaften bestehen. Natürliche Rohstoffe hingegen bedingen einen gewissen Grad an Verunreinigungen, wobei die Art und Menge vom jeweiligen Herkunftsort abhängt.

² Bergmann, W.: Werkstofftechnik 1, S. 405

³ Bergmann, W.: Werkstofftechnik 1, S. 410

⁴ Salmang H., Scholze H.: Keramik, S. 3-4

Beide Sorten erfahren eine umfangreiche Aufbereitung durch Reinigen, Mahlen und Sieben.⁵ Sinterpulver aus Al_2O_3 -Keramik werden in der Regel durch sogenanntes Calcinieren gewonnen. Dabei werden geeignete Minerale mittels chemischen Aufschlusses in Lösung gebracht und das Fällungsprodukt wird einer Vorsinterung unterzogen, bei der Wasser abgespalten wird. Dieses Calcinationsgut wird anschließend auf die gewünschte Teilchengröße gemahlen.

Mögliche Methoden zur Herstellung von Oxidkeramiken sind laut Bergmann (BERGMANN, 2003/2005) das Heißpressen, das Flüssigphasen- und das Festphasensintern. Das Heißpressen ist eine teure Variante, daher kommen meist die Sinterverfahren zum Einsatz. Beim Flüssigphasensintern sind neben dem Keramikpulver zu einigen Prozent verschiedene Zusätze, die eine Kornwachstumshemmende und flüssigphasenbildende Wirkung besitzen, enthalten (z. B. Kaolin, Talk, Kalk).

Beim Festphasensintern wird ein höherer Aufwand betrieben, um auch ohne diese flüssige Phase ein dichtgesintertes Gefüge zu erhalten. Als Sinteradditiv sind hier nur einige Zehntel bis Hundertstel Prozent Magnesiumoxid (MgO) enthalten, das als Kornwachstumsinhibitor fungiert.

Als zentrales Problem bei den konventionellen Herstellungsverfahren wie z. B. Pressen und Gießen nennt Nagel (NAGEL, 1996) die relativ großen Schwindungen und Maßtoleranzen, wodurch die Anforderungen an Maßhaltigkeit, Reproduzierbarkeit und Bauteilgeometrie nur bedingt erfüllt werden können.

2.1.3 Fügen von Al_2O_3 -Keramik

Beim Fügen keramischer Werkstoffe sollen die positiven Eigenschaften des Materials weitgehend erhalten bleiben, es besteht demnach ein hoher Anspruch an die Festigkeit der Verbindung.

Nagel (NAGEL, 1996) benennt Nachteile in der Hochtemperaturanwendung und eine unzulässig starke Beeinflussung von chemischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften als Gründe dafür, dass form- und kraftschlüssige Verbindungen nicht geeignet sind. Bei stoffschlüssigen Fügeverfahren wie Kleben oder Löten kommt es zu ähnlichen Einbußen.⁶

Geklebte oder gelötete Keramiken sind nur beschränkt im Hochtemperaturbereich ($> 1200^\circ\text{C}$) anwendbar. Der Vorteil eines sehr hohen Schmelzpunktes des Werkstoffs bei 2050°C wird dadurch relativiert. Teilweise erfordern diese Verfahren komplizierte Apparaturen, Hochvakuum und Schutzmaßnahmen und sind daher sehr aufwendig. Alternative Schweißverfahren, wie Diffusionsschweißen und Elektronenstrahlschweißen erfordern ebenfalls einen hohen Aufwand bezüglich des Verfahrens und der Vorbereitung der Fügepartner.

2.1.4 Problembeschreibung

Den zahlreichen, bereits beschriebenen Vorteilen stehen allerdings auch nachteilige Eigenschaften gegenüber, die beim Einsatz und der Bearbeitung von Keramiken unbedingt beachtet werden müssen. Bargel (BARGEL, 2004) benennt eine große Kerbempfindlichkeit, die Unfähigkeit mechanische Spitzenbeanspruchungen durch lokale plastische Verformung abzubauen und eine geringe Schlagbiegefestigkeit als ungünstige Eigenschaften des Materials.

⁵ Bergmann, W.: Werkstofftechnik 2, S. 66

⁶ Nagel, A.-M.: Untersuchungen zum Laserschweißen von Keramik, S. 6

Im Vergleich zu metallischen Konstruktionswerkstoffen besitzen Keramiken eine sehr geringe Duktilität. Als Duktilität bezeichnet man die Eigenschaft eines Werkstoffes, sich bei Überbelastung plastisch zu verformen, bevor er versagt. Bei sprödharten Materialien können innere und äußere Spannungen nicht im Kristallgitter abgebaut werden, da kovalente und ionische Bindungen Versetzungsbewegungen erschweren bzw. unmöglich machen. Das führt zu starken Spannungsüberhöhungen an Gefügefehlern und damit zu einer Begünstigung von Rissen.

Weiterhin besitzen Keramiken eine geringe Zugfestigkeit, eine hohe Sprödigkeit und weisen eine geringe Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) auf. Letztere wird in der Deutschen Industrienorm (DIN 51068, 1976/1980) wie folgt definiert: „Der Begriff TWB kennzeichnet allgemein das Verhalten gegenüber der wiederholten Einwirkung von Wärmespannungen im veränderlichen Temperaturfeld. Dieses Verhalten wird vom Werkstoffgefüge sowie von Form und Volumen des Erzeugnisses beeinflusst und ist beanspruchungsabhängig.“

Auf die Temperaturwechselbeständigkeit soll im Folgenden genauer eingegangen werden, da sie beim Laserprozess die größte Schwierigkeit darstellt. Dem Entstehen von thermischen Spannungen, die bis zum Werkstückversagen führen können, liegen verschiedene Ursachen zu Grunde. Nebeneinander existierende Phasen mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten können zur Rissbildung führen. Salmang (SALMANG, 2007) erläutert die Rolle von schnellen Temperaturschwankungen an folgendem Beispiel: Wenn eine Keramikplatte der Temperatur T_0 auf die niedrigere Temperatur T abgeschreckt wird, ist deren Oberfläche bestrebt, sich um $\alpha \cdot \Delta T$ zu kontrahieren.

Das Innere der Platte hat jedoch noch die ursprüngliche Temperatur und damit noch die gleiche Dimension. Das führt zu Zugspannungen σ_Z an der Oberfläche der Keramik:

$$\sigma_Z = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot (T_0 - T) \quad (1)$$

α – *thermischer Ausdehnungskoeffizient*

E – *Elastizitätsmodul*

Der Ausdruck $(1 - \mu)$ steht dabei für die Geometrie der Keramik. Ändert sich die Temperatur T_0 durch schnelles Aufheizen, kommt es zu Druckspannungen an der Oberfläche. Die Gleichung (1) ist nur dann gültig, wenn die Temperaturänderung an der Oberfläche sehr schnell statt findet und die Temperatur im Inneren des Körpers „nachhinkt“. Das ist vor allem bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit λ der Fall. Wird der Temperaturunterschied $\Delta T = T_0 - T$ so groß, dass σ_Z den Wert der Zugfestigkeit erreicht, kommt es zum Bruch des Werkstücks. Daraus ergibt sich eine maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} , die der Probekörper verträgt:

$$\Delta T_{max} = \frac{\sigma_Z \cdot (1 - \mu)}{\alpha \cdot E} \equiv R \quad (2)$$

(gilt für unendlich großen Wärmeübergang)

R wird als erster Wärmespannungsparameter bezeichnet und ist eine Materialkonstante. Um die Temperaturwechselbeständigkeit eines Körpers vollständig zu beschreiben, ist auch der zweite Wärmespannungsparameter R' notwendig, der von der Wärmeübergangszahl h , dem geometrischen Formfaktor C und der Wärmeleitfähigkeit λ abhängt.⁷ Darauf soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen werden.

⁷ Salmang H., Scholze H.: Keramik, S. 409

Unterschiedliche Aussagen finden sich in der Literatur zum Einfluss der Porosität auf das Temperaturverhalten von Keramiken. So zeigten die Untersuchungen von Coble und Kingery (COBLE, 1955), dass die Porosität des Werkstoffs zu einer deutlichen Reduzierung seiner TWB führt. Ihre Untersuchung mit Aluminiumoxidkeramik ergaben bei 600°C eine Erniedrigung des ersten Wärmespannungsparameters R von 175 Kelvin (dichte Packung) auf 70 Kelvin (20% Porosität) und 52 Kelvin (50% Porosität). Praktische Untersuchungen ergaben jedoch ein Maximum der TWB bei einer Porosität von 20%. Das ist dadurch zu erklären, dass Temperaturspannungen und Risse in den Poren abgefangen werden.

Die maximale Abkühlgeschwindigkeit, bei der noch keine Risse auftreten, ist in der Literatur wie folgt angegeben:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{max} = \frac{\sigma_Z \cdot (1-\mu)}{\alpha \cdot E} \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{3}{b^2} \quad (3)$$

c – spezifische Wärmekapazität

ρ – Rohdichte

λ – Wärmeleitfähigkeit

b – halbe Dicke einer Platte

Wie durch diese kurze Umreiung verdeutlicht werden sollte, ist die Temperaturwechselbeständigkeit von sehr vielen Faktoren abhängig und nur durch aufwendige Temperaturprofilmodelle zu simulieren. Um genauere Untersuchungen zum temperaturabhängigen Rissverhalten der Keramik anzustellen, wäre eine Prozessbeobachtung mit einer Wärmebildkamera notwendig. Diese müsste neben einer hohen Auflösung auch über eine sehr schnelle Verarbeitung verfügen, um Aufschluss über die Änderung des Temperaturfeldes zu geben, da der Energieeintrag lokal extrem begrenzt ist. Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit stand eine derartige Kamera nicht zur Verfügung, so dass der Schwerpunkt auf der experimentellen Ermittlung geeigneter Prozessparameter lag. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll daher nicht tiefer auf die TWB eingegangen werden.

2.1.5 Stand der Technik

Es existieren verschiedene Verfahren zum Fügen keramischer Werkstoffe. Neben dem Schweißen finden auch Klebe- und Lötverfahren häufigen Einsatz in der Technik. Das Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung (IFW) setzt verschiedene Varianten zum Fügen von Keramiken ein. Beim Diffusionsschweißen, das unterhalb der Schmelztemperatur stattfindet, werden die Oberflächen der Fügepartner durch Polierprozesse optimal angeglichen. Temperatur, Druck und bestimmte Haltezeiten begünstigen Diffusionsvorgänge, die zu einer stoffschlüssigen Verbindung führen. Bei dieser Fügevariante sind keine Zusatzwerkstoffe wie Lote oder Kleber notwendig, was sich laut IFW günstig auf das Festigkeitsverhalten auswirkt.⁸

Auch im Bereich des Klebens arbeiten zahlreiche Forschungsgruppen an Verbesserungsmöglichkeiten des Verfahrens. So werden hochtemperaturbeständige, anorganische Kleber eingesetzt, die bei Temperaturen bis zu 1600°C eingesetzt werden können.⁹ Zur Verbesserung der Haftfestigkeit von Klebverbindungen werden unterschiedliche Methoden der Oberflächenbehandlung eingesetzt, wie das Atmosphärenplasmaverfahren (IFW) oder lasergestützte Oberflächenaktivierung.

⁸ URL: <http://www.ifw-jena.de/files/10CED407EC0/Ausgew%E4hlte%20Ergebnisse.pdf>, Stand: 14.10.2010

⁹ URL: http://www.ifw-jena.de/www/ifw_ft/forschung/schwerpunkte/?thema=10BF55DB14B&navid=10BC7DD3E0D, Stand: 14.10.2010

Beim Löten von keramischen Werkstoffen kommen verschiedene Lote zum Einsatz, die einen Einsatz des gefügten Teils bis etwa 1500°C erlauben. Bei dieser Variante können druckfeste, vakuumdichte Verbindungen erzeugt werden.

Mit dem Laserstrahlschweißen von Keramiken haben sich ebenfalls verschiedene Wissenschaftler beschäftigt. Nagel (NAGEL, 1996) nennt als Institutionen mit vergleichbaren Projekten neben dem Laserinstitut Mittelsachsen e. V. das Laserzentrum Hannover, die Osaka Universität in Japan und ein Institut in Villeurbanne in Frankreich.¹⁰

Größtenteils finden CO₂-Laser im Pulsbetrieb Anwendung bei der Bearbeitung von Keramik, da ihre Strahlung besser absorbiert wird und im pulsed-wave Regime hohe Spitzenleistungen erzielt werden. Die Vorheizung des Materials wird in der Regel mit Öfen oder Gasbrennern realisiert. Eine Arbeitsgruppe am Laserinstitut Mittelsachsen e. V. unter Professor Dr.-Ing. Exner entwickelte ein Laserzweistrahilverfahren zum Vorheizen und Schweißen der Keramik. Mit dieser Variante wurden rissfreie Schweißverbindungen realisiert.

Die verschiedenen Untersuchungen beschränkten sich größtenteils auf einfache Schweißgeometrien, wie Stumpfstoß- und Bördelnähte und I-, L- oder T-Stücke. Die Verschweißung rotations-symmetrischer Teile, wie beispielsweise Rohre, gelang nur der Forschungsgruppe des LIM mit zufriedenstellenden Ergebnissen.

2.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der Bachelorarbeit war es, zu untersuchen inwieweit sich Aluminiumoxidkeramik ohne Vorheizprozess schweißen lässt. Zur Verfügung stand ein Ytterbium-dotierter Singlemode Faserlaser, der im continuous-wave (cw) Regime betrieben wird. Im Rahmen der Arbeit sollten Blindschweißungen an Keramiken verschiedener Reinheitsgrade und Dicken durchgeführt werden, um geeignete Prozessparameter zu ermitteln. Im Anschluss daran sollten mit den geeigneten Parametersätzen Schweißungen von Winkeln und im Stumpfstoß realisiert werden. Die Qualität der Fügestellen sollte sowohl optisch, also durch Schliff und REM- und Mikroskopaufnahmen, als auch durch eine Festigkeitsuntersuchung beurteilt werden. Die Schweißvorrichtungen für die Winkel- und Stumpfstoßschweißung sollten konstruiert werden, ebenso die Aufsätze für die Prüfmaschine zum 4-Punkt-Biegebruchversuch.

¹⁰ Nagel, A.-M.: Untersuchungen zum Laserschweißen von Keramik, S. 8

3 Verwendete Materialien

3.1 Haupteigenschaften der Keramiken

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde Aluminiumoxidkeramik in verschiedenen Reinheitsgraden und Dicken verwendet. Neben einer Al_2O_3 -Keramik mit 96% Reinheit, die in der Industrie sehr häufig eingesetzt wird, wurden 93%ige und 99,6%ige Keramiken untersucht. Tabelle 1 zeigt die für die Versuche zur Verfügung stehenden Keramiken des Herstellers LCP GmbH und deren Dicken.

Reinheitsgrad [%]	Dicke [mm]
93	0,63
96	0,5
96	0,63
96	0,77
96	1,25
96	2,0
99,6	1,0

Tabelle 1: *Verfügbare Al_2O_3 -Substrate*

Bei Aluminiumoxidkeramik handelt es sich um den oxidkeramischen Werkstoff, der in der Technik die breiteste Anwendung gefunden hat. Ob als verschleißfester Werkstoff im Maschinen- und Anlagenbau, als Schneidwerkstoff, als korrosionsfestes Material in der chemischen Industrie, als Isoliermaterial in der Elektrotechnik und Elektronik, in der Medizintechnik oder als Hochtemperaturwerkstoff in der Wärmetechnik, die Anwendungen und Funktionen von Aluminiumoxidkeramiken sind sehr vielfältig. Al_2O_3 ist ein binäres Oxid, das hexagonal kristallisiert. Diese Kristallstruktur wird als Korund bezeichnet.

Mit 2050°C besitzt Aluminiumoxidkeramik eine relativ hohe Schmelztemperatur, das Material wird jedoch bereits ab 1200°C duktil. Ab 3000°C verdampft Aluminiumoxidkeramik.

Die Keramikplatten mit der Abmessung von ca. 113 x 113 mm² bzw. 100 x 100 mm² wurden mit dem Foliengießverfahren hergestellt. Bei dieser Art der Herstellung wird keramisches Pulver in organischen oder wässrigen Lösungen mit Bindern, Verflüssigern und Plastifizierern dispergiert.¹¹ Der entlüftete und homogenisierte Schlacker wird auf ein Band gegossen und durch Stanzen werden Keramikplatten in der gewünschten Größe hergestellt. Für die benötigte Sinteraktivität ist eine Kornfeinheit des Pulvers notwendig, in der Regel nutzt man Rohstoffpulver mit Korngrößen < 2 µm. Mit Hilfe einer Schneide wird beim Guss die gewünschte Foliendicke eingestellt.¹²

Die Al_2O_3 -Foliengießmasse besteht in der Regel neben Al_2O_3 -Pulver (40 - 50%) und destilliertem Wasser (30 - 50%) aus verschiedenen Zusätzen. So wird unter anderem bis zu 3% MgO-Pulver zugesetzt, das als Kornwachstumsinhibitor fungiert.¹³ Dadurch wird die Bildung sehr großer Kristalle unterdrückt, die eine Festigkeitsminderung zur Folge haben. Es ist demnach zu erwarten, dass zumindest Spuren von Magnesium durch die EDX-Analyse im Material detektiert werden.

¹¹ Salmang, H.: Keramik, S. 602

¹² Schaumburg, H.: Keramik, S. 123

¹³ Salmang, H.: Keramik, S. 602

In der Literatur findet man viele verschiedene Kennwerte von Aluminiumoxidkeramiken. Da Nagel (NAGEL, 1999) in ihren Untersuchungen ebenfalls die 96%ige Al_2O_3 -Keramik C 795 vom gleichen Hersteller verwendete, zeigt Tabelle 2 die von ihr genannten Haupteigenschaften des Werkstoffs.

Al_2O_3 -Gehalt	96%
Kristallmodifikation	α - Al_2O_3
Dichte	3,7 g/cm ³
Mikrostruktur	polykristallin
durchschn. Korngröße	3,0 μm
max. Rauhtiefe	4,7 μm
mittlere Rauhtiefe	0,65 μm
Wasserabsorption	0%
Vickers Härte	1500 kp/mm ²
Elastizitätsmodul	350 GPa
Schmelztemperatur	2050°C
Siedetemperatur	3530°C
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 40...400°C	$6,8 \times 10^{-6}$
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 400...800°C	$7,6 \times 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	27 W/m K

Tabelle 2: *Eigenschaften von C 795 Al_2O_3 nach (NAGEL, 1999)*

Aluminiumoxidkeramik ist sehr beständig gegen Säuren und Laugen, wobei diese Resistenz von der Porosität und Art und Menge der Zuschlagstoffe abhängig ist.

Die elektrischen Eigenschaften von Al_2O_3 -Keramik sind stark von der Reinheit des Materials und der Temperatur abhängig. Hochreines Aluminiumoxid besitzt bei Raumtemperatur einen spezifischen elektrischen Widerstand von $10^{15} \Omega \text{ cm}$, bei 1400°C noch $10^6 \Omega \text{ cm}$. Der elektrische Widerstand nimmt mit abnehmendem Al_2O_3 -Gehalt weiter ab.¹⁴

Von besonderem Interesse für die Lasermaterialbearbeitung sind die optischen Eigenschaften des Materials. Bei der Wellenlänge von 10,6 μm des CO_2 -Lasers weist Aluminiumoxidkeramik eine sehr gute Absorption A mit einem Absorptionsgrad von bis zu 90% auf. Im Wellenlängenbereich des Nd:YAG-Lasers bei 1064 nm ist die Absorption deutlich geringer und stark abhängig von Verunreinigungen und Temperatur.

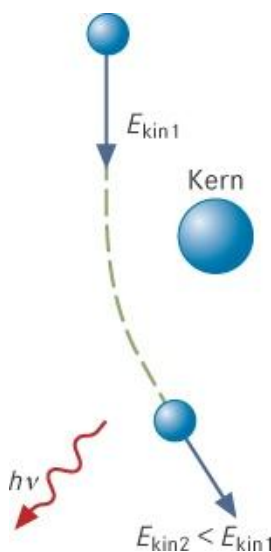
¹⁴ Salmang, H.: Keramik, S. 809

3.2 EDX-Analyse

Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (energy dispersive x-ray spectroscopy, kurz: EDX) wurde die Zusammensetzung der Keramiken genauer untersucht. Bei diesem Messverfahren werden Atome mittels Elektronenstrahl angeregt. Dabei werden Elektronen aus einer der inneren Schalen des Atoms herausgeschlagen. Da dieser Zustand sehr instabil ist, nimmt unmittelbar danach ein Atom aus einem höheren Energieniveau diesen Platz ein. Die Energiedifferenz der beiden Orbitale wird in Form eines Röntgenquants ausgesendet. Die auf diese Weise emittierte Strahlung ist typisch für diesen Übergang und das Atom und somit auch für das Element. Es gibt verschiedene erlaubte Übergänge für die Elektronen.

Diese sind charakteristisch für ein Element, je nachdem aus welchem Orbital das energiereichere Elektron kommt und aus welchem Energieniveau das Elektron herausgeschlagen wurde.

Dadurch gibt es im aufgenommenen Spektrum verschiedene charakteristische Röntgenlinien, die als K_α , K_β , L_α usw. bezeichnet werden. Die Verteilung dieser Röntgenlinien im Spektrum gibt Auskunft darüber, welche Elemente im Material vorhanden sind. Die Ausprägung dieser Linien lässt außerdem auf die Konzentration des jeweiligen Elements schließen.



Das EDX-Spektrum enthält außerdem die sogenannte Bremsstrahlung, die durch das Abbremsen der Elektronen im Coulombfeld der Atome verursacht wird (siehe Abbildung 1)¹⁵. Aus diesem Grund wird die Strahlung auch als Bremsstrahlung bezeichnet, deren Abstrahlung vorwiegend senkrecht zur Richtung der Beschleunigung erfolgt.

Die Bremsstrahlung weist ein kontinuierliches Spektrum auf, das auf einer Seite scharf begrenzt ist, da die abgegebene elektromagnetische Strahlung maximal die gesamte Energie des beschleunigten Elektrons übernehmen kann. Das Spektrum der Bremsstrahlung besitzt also eine minimale Wellenlänge, die sogenannte Grenzwellenlänge.

Die Transferierung des detektierten Spektrums in quantitative Elementgehalte erfolgt durch das Messgerät über einen komplexen mathematischen Prozess, der unter anderem als ZAF- oder Phi(rho z)-Matrixkorrektur bekannt ist.¹⁶

Abbildung 1

Die Röntgenmikroanalyse ist ein oberflächensensitives Verfahren, das heißt es werden nur Informationen aus dem oberen Bereich des untersuchten Werkstoffs gewonnen. Die Tiefe, aus der die Informationen kommen hängt dabei maßgeblich von der Eindringtiefe der Elektronen und damit von der Beschleunigungsspannung ab. Ein weiterer Einflussfaktor für die Informationstiefe ist die Weglänge, die die entstehende Röntgenstrahlung durch die Probe zurück legen kann (siehe Abbildung 2). Dennoch kann mit diesem Verfahren nur eine Aussage über die Elementverteilung im oberflächennahen Bereich einer Probe getroffen werden, die Informationstiefe liegt zwischen einem und einigen Mikrometern. Problematisch wäre das, sollte die Keramik durch Diffusionsprozesse während der Herstellung, bei denen die Zuschlagstoffe nach außen transportiert werden, eine inhomogene Elementverteilung besitzen.

¹⁵ URL: <[http://lexikon.meyers.de/wissen/Bremsstrahlung+\(Sachartikel\)](http://lexikon.meyers.de/wissen/Bremsstrahlung+(Sachartikel))>, Stand: 07.01.2009

¹⁶ Quantax Benutzerhandbuch, S. 23

Eine weitere Fehlerquelle bei dieser Analyse könnte darin liegen, dass es sich bei Keramik um ein Material mit relativ schlechter elektrischer Leitfähigkeit handelt. Eine gute Leitfähigkeit ist jedoch wünschenswert wegen der hohen Stromstärke des Elektronenstrahls und weil Ladungen auf der Oberfläche der Probe das Ergebnis verfälschen. Aus diesem Grund wird mit verhältnismäßig niedrigen Beschleunigungsspannungen gearbeitet, was wiederum geringe Eindringtiefen zur Folge hat.

Fette, Schmutz und organische Reste auf der Probenoberfläche erhöhen zudem das Kohlenstoffsignal und verfälschen damit das Ergebnis. Um diese unerwünschten Einflüsse zu minimieren, wurden die Keramikproben vor der Untersuchung im Ultraschallbad gereinigt. Die auf allen Körpern vorhandene Wasserhaut ist ebenfalls eine Fehlerquelle (erhöhte Konzentration von Wasserstoff und Sauerstoff).

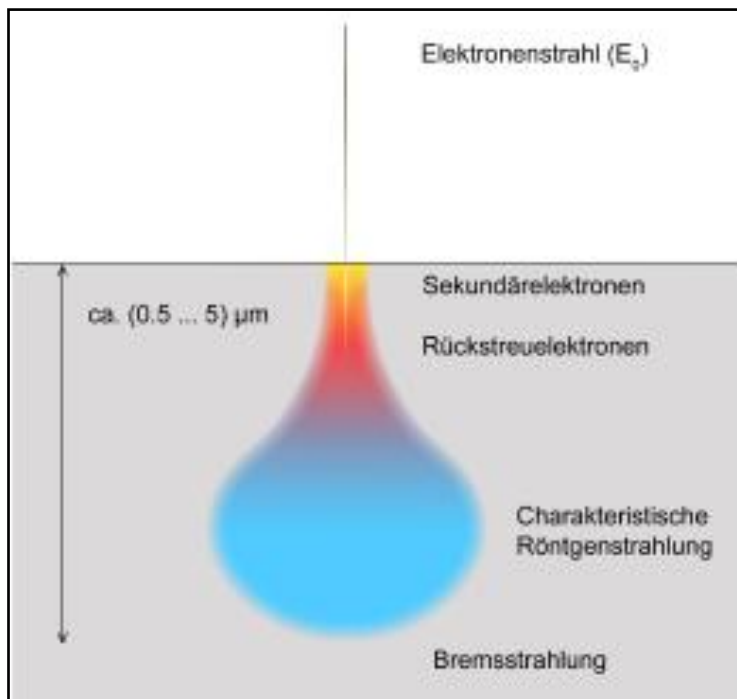


Abbildung 2: Grafik zur Informationstiefe der EDX-Analyse¹⁷

Die EDX-Analyse der vorliegenden Materialien ergab folgende Werte, die in den Tabellen 3 bis 5 dargestellt sind.

Element	Ordnungszahl	Serie	unnorm. C	norm. C	atom. C	Fehler
			[Gewichts-%]	[Gewichts-%]	[At.-%]	
O	8	K-Serie	64,97	60,87	69,55	7,4
Al	13	K-Serie	34,77	32,57	22,07	1,7
C	6	K-Serie	4,98	4,67	7,1	0,8
Si	14	K-Serie	1,51	1,42	0,92	0,1
Mg	12	K-Serie	0,51	0,47	0,36	0,1
Summe:			106,74	100	100	

Tabelle 3: EDX-Analyse der 93%igen Al_2O_3 -Keramik

¹⁷ Quantax Benutzerhandbuch, S. 32

Element	Ordnungszahl	Serie	unnorm. C	norm. C	atom. C	Fehler
			[Gewichts-%]	[Gewichts-%]	[At.-%]	[%]
O	8	K-Serie	66,27	61,25	70,73	7,5
Al	13	K-Serie	37,22	34,4	23,56	1,8
C	6	K-Serie	3,47	3,21	4,93	0,6
Si	14	K-Serie	0,88	0,81	0,53	0,1
Mg	12	K-Serie	0,35	0,33	0,25	0
Summe:			108,19	100	100	

Tabelle 4: EDX-Analyse der 96%igen Al_2O_3 -Keramik

Element	Ordnungszahl	Serie	unnorm. C	norm. C	atom. C	Fehler
			[Gewichts-%]	[Gewichts-%]	[At.-%]	[%]
O	8	K-Serie	67,6	62	70,95	7,7
Al	13	K-Serie	36,41	33,39	22,66	1,8
C	6	K-Serie	4,17	3,83	5,83	0,7
Mg	12	K-Serie	0,46	0,43	0,32	0,1
Si	14	K-Serie	0,4	0,36	0,24	0,1
Summe:			109,05	100	100	

Tabelle 5: EDX-Analyse der 99,6%igen Al_2O_3 -Keramik

Theoretisch sollten bei einer hochreinen Aluminiumoxidkeramik 40% Aluminiumatome und 60% Sauerstoffatome detektiert werden. Überträgt man dieses Verhältnis auf die anderen Reinheitsgrade erhält man:

Reinheitsgrad	Anteil Aluminium	Anteil Sauerstoff
in %	in %	in %
100,0	40,00	60,00
99,6	39,84	59,76
96,0	38,40	57,60
93,0	37,20	55,80

Tabelle 6: Anteile von Al und O nach Reinheitsgrad

Bei den unnormierten Werten aus Tabelle 3 Tabelle 5 bis 5 handelt es sich um die vom System detektierten. Die Summe dieser Werte beträgt im Idealfall 100% und liegt zwingend zwischen 90% und 110%. Die unnormierten Werte werden auf 100% normiert, was in den zwei Spalten rechts daneben erfolgt ist. Die normierten Werte sind sowohl in Gewichtsprozent, als auch in Atomprozent angeben. Das ist besonders dann von Bedeutung, wenn sich die detektierten Elemente stark in ihren Atommassen unterscheiden.

Neben den erwarteten Hauptbestandteilen Aluminium und Sauerstoff ergab die Analyse die Zuschlagstoffe Kohlenstoff, Silicium und Magnesium. Diese werden beim Herstellungsprozess der Keramik zugegeben, um gezielt Eigenschaftsmodifizierungen vorzunehmen. Um die vom Hersteller angegebene Reinheit zu bestätigen, ist diese Methode des Messens durch die bereits genannten Fehlerquellen zu ungenau. Wie bereits angenommen, ist Magnesium in den Keramiken enthalten, das als MgO-Pulver dazu dient, das Kornwachstum zu verhindern.

Silicium ist ebenfalls im Material enthalten, was laut Salmang (SALMANG, 2007) üblich ist, da beispielsweise bei handelsüblichen Al_2O_3 -Keramiken mit 95%iger Reinheit ein SiO_2 -Anteil von 3,3 Gewichtsprozent enthalten ist.¹⁸

Die Spektren der EDX-Analyse sind im Folgenden dargestellt, in denen auch die jeweiligen Elemente zu den Peaks zugeordnet wurden. Um die Reinheitsgrade des Herstellers zu bestätigen, ist die EDX-Analyse nicht genau genug. Die Messungen ergaben keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei verschiedenen Materialien.

Dies kann zum Einen an der zu geringen Eindringtiefe des Elektronenstrahls durch die niedrige Beschleunigungsspannung, der herstellungsbedingten Diffusion der Zuschlagstoffe in die Randbereiche des Materials oder an der Wasserhaut und Verunreinigungen liegen. Erschwerend hinzu kommt, dass die EDX-Messung erfahrungsgemäß unterhalb von zwei Prozent sehr ungenau wird.

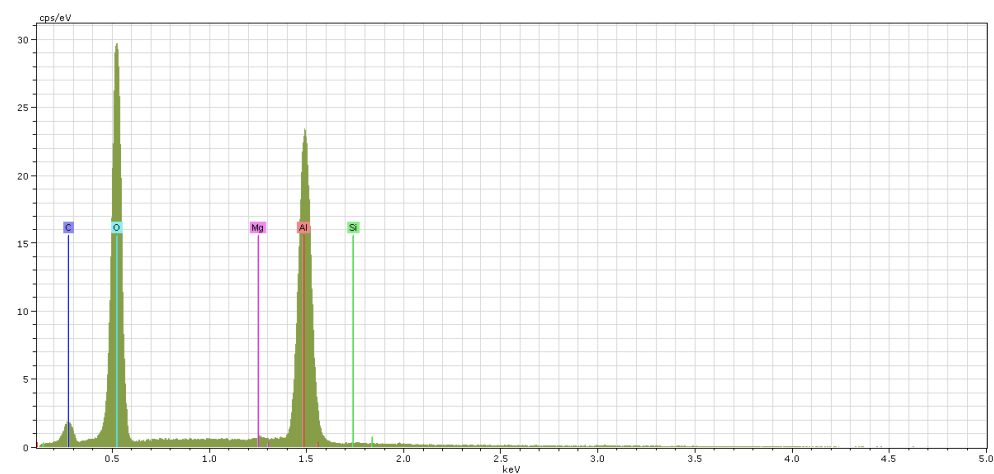


Abbildung 3: Spektrum der EDX-Analyse von 99,6%iger Al_2O_3 -Keramik

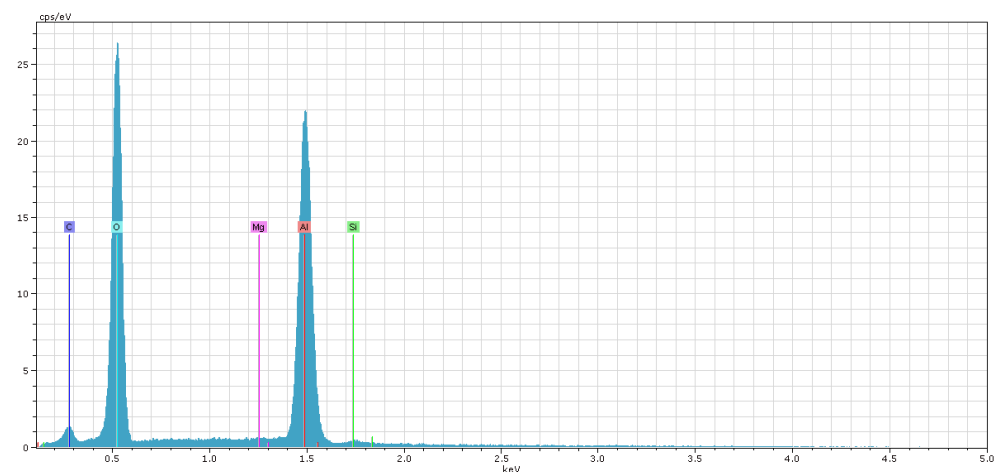


Abbildung 4: Spektrum der EDX-Analyse von 96%iger Al_2O_3 -Keramik

¹⁸ Salmang, H.: Keramik, S. 785

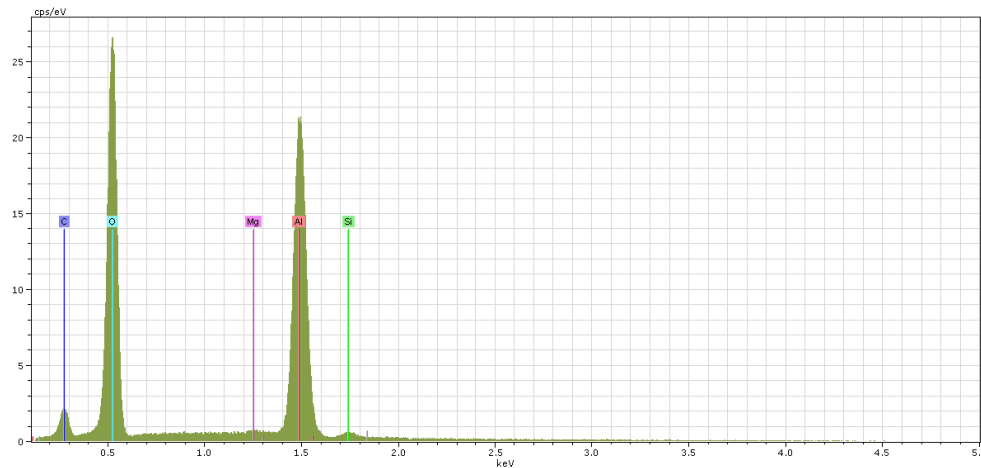


Abbildung 5: Spektrum der EDX-Analyse von 93%iger Al_2O_3 -Keramik

3.3 REM-Analyse

Beim Rasterelektronenmikroskop (kurz: REM) wird ein hochenergetischer Elektronenstrahl über die Oberfläche einer Probe gerastert. Durch die Wechselwirkung der Elektronen mit den Probenatomen entstehen Sekundärelektronen und rückgestreute Elektronen, die zur Auswertung genutzt werden. Bei elektrischen Isolatoren dienen nur die rückgestreuten (backscattered) Elektronen zur Analyse.

Die vom Objekt rückgestreuten Elektronen haben typische Energien von einigen Kiloelektronenvolt. Als Beschleunigungsspannung U_B wurde 5000 V eingestellt. Untersucht wurde eine Fläche von ca. $100 \times 60 \mu\text{m}^2$, das entspricht einer tausendfachen Vergrößerung.

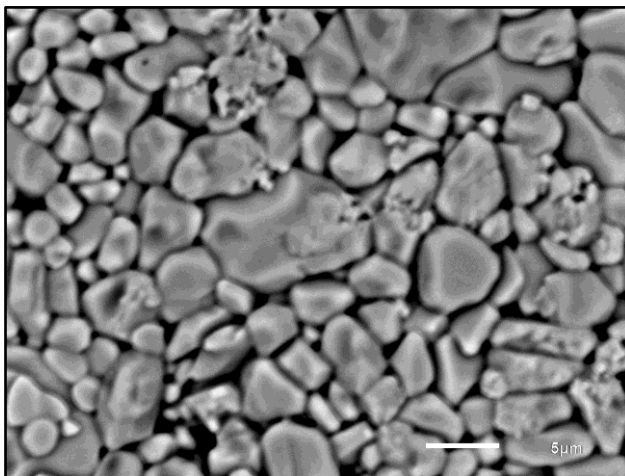


Abbildung 6: REM-Aufnahme der Keramikoberfläche von 96%igem Al_2O_3

Abbildung 6 zeigt die Oberfläche der verwendeten 96%igen Keramik stark vergrößert. Es handelt sich um ein sehr feinkörniges und gleichmäßiges, polykristallines Gefüge, bei dem deutlich die einzelnen Körner sichtbar sind. Die durchschnittliche Korngröße beträgt $3 \mu\text{m}$. Die Probe wurde vor der Aufnahme nicht geschliffen oder anderweitig bearbeitet. Die Oberfläche der Keramik sorgt durch die feine Körnung für eine nahezu ideale Streuung der Laserstrahlung, dadurch ist keine Gefährdung der Optik oder Strahlquelle zu befürchten.

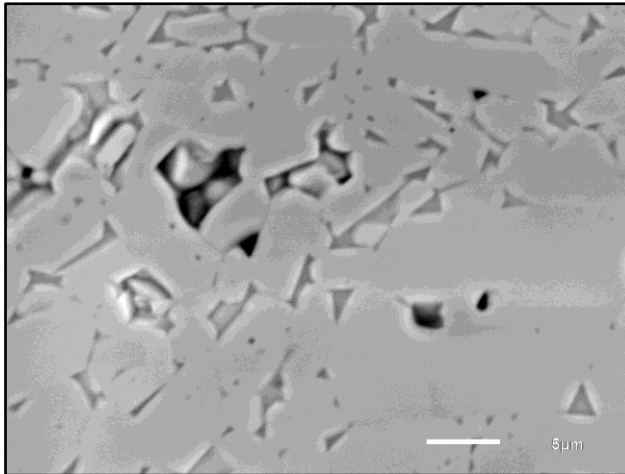


Abbildung 7: REM-Aufnahme einer geschliffenen Keramikprobe

Es wurde eine REM-Aufnahme von einer geschliffenen und polierten Keramikprobe gemacht, um sie mit dem unbearbeiteten Zustand vergleichen zu können (Abbildung 7).

Abbildung 7 zeigt die REM-Aufnahme der geschliffenen Probe im gleichen Maßstab wie zuvor die unbearbeitete Keramik. Das Bild ermöglicht eine bessere Beurteilung der Porosität, da der Werkstoff auf eine Ebene glatt geschliffen wurde. Die Kornzwischenräume, die in etwas dunklerem Grau abgebildet sind als die Körner, sind klein und relativ gleichmäßig verteilt. Die dunkleren Bereiche deuten auf tiefere Hohlräume hin, treten aber nur vereinzelt auf. Die verwendete Keramik zeichnet sich durch eine geringe Porosität aus.

4 Technische Ausrüstung

4.1 Laseranlage

4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Faserlasers

Der Faserlaser gehört zur Gruppe der Festkörperlaser, jedoch mit einem speziellen Aufbau und besonderen Eigenschaften. Bei einem Faserlaser fungiert der mit Ionen aus der Gruppe der seltenen Erden dotierte Kern der Faser als laseraktives Medium. Die Dotierung steigt in der Regel mit der Faserlänge, um eine gleichmäßige Absorption der Pumpstrahlung über die ganze Faser zu erreichen.

Faserlaser werden üblicherweise optisch gepumpt, was in diesem Fall durch Laserdiodenbarren realisiert wird. Dabei wird die Pumpstrahlung parallel zur Faserlängsachse in den Faserkern bzw. -mantel eingekoppelt. Häufig findet man auch Doppelkernfasern, bei denen der Kern der Faser mit dem aktiven Medium koaxial in einen Pumpkern eingebettet ist. Dieser Aufbau ermöglicht das Einkoppeln von Pumpstrahlung mit geringer Strahlqualität und hoher Leistung, wie es z. B. bei Laserdioden der Fall ist.¹⁹

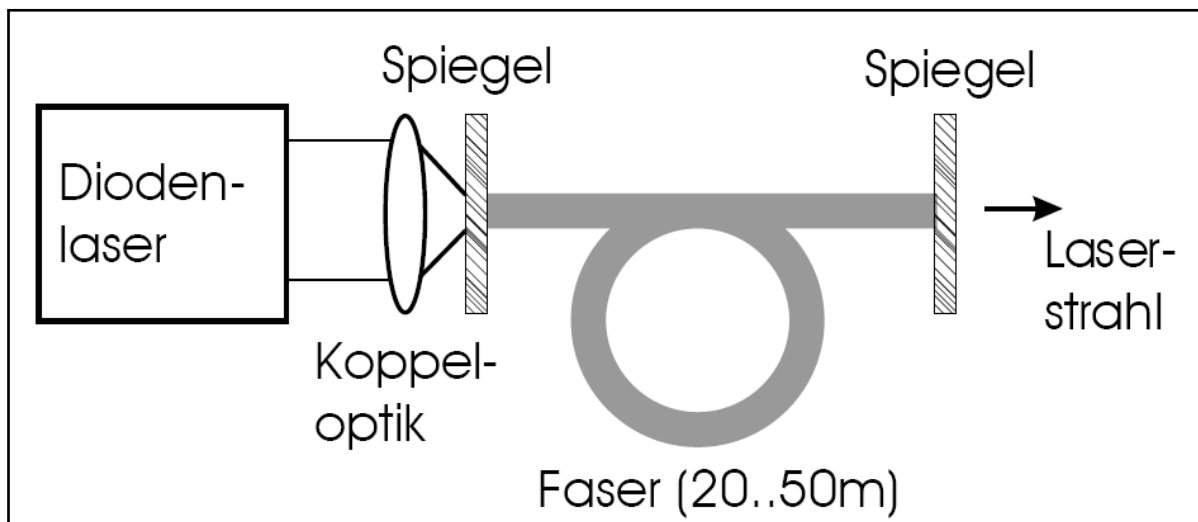


Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers²⁰

Die Faser leitet Strahlung dabei nach dem Prinzip eines Lichtwellenleiters, als Stufenindexfaser mit einem definierten Brechzahlunterschied zwischen Faserkern und -mantel. Gradientenindexfasern mit einem kontinuierlichen Brechzahlverlauf, in denen die Lichtausbreitung nach dem Huygensschen Prinzip erfolgt, sind nur für geringe Leistungen anwendbar. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau eines Faserlasers.

Die große Oberfläche der Faser sorgt für eine gleichmäßige und effiziente Kühlung, wodurch thermische Effekte, die eine Verschlechterung der Strahlqualität zur Folge haben, verringert werden können.²¹

¹⁹ Laser und Produktion. Spezial: Faserlaser, S. 4

²⁰ URL: < http://www.personal.uni-jena.de/~p3dosv/pdf/Faserlaser_Script.pdf>, Stand: 31.05.2010

²¹ URL: < <http://www.iws.fraunhofer.de/faserlaser/faserlaser.html>>, Stand: 31.05.2010

Als besondere Vorteile von Faserlasern werden gute elektrisch-optische Wirkungsgrade, herausragende Strahlqualitäten (bei Monomode-Faserlasern), hohe Lebensdauern und der unempfindliche Aufbau genannt. Nach Austritt aus der aktiven Faser wird die Laserstrahlung meist über einen Lichtwellenleiter zur Bearbeitungsoptik geführt. Dadurch wird der Justageaufwand minimal.

Als Resonator können die verspiegelten Faserendflächen dienen oder mittels UV-Laser in die Faser eingeschriebene Bragg-Gitter. Durch die große Resonatorlänge wird Laserstrahlung mit hoher Strahlgüte erzeugt.

4.1.2 Kenndaten von Anlage und Strahlquelle

Der verwendete Laser (siehe Abbildung 9) ist ein Ytterbium-dotierter Faser Laser der Firma IPG mit der Produktbezeichnung YLR-3000 SM. Das IPG Lasermodell YLR-3000 SM ist ein Produkt der Laserschutzklasse IV, bei geschlossenem Gehäuse entspricht die Anlage der Klasse I. Der Laser ist klassifiziert als Hochleistungslaser nach 21 CFR 1040.10 und IEC 60825.



Der YLR-3000 SM ist ein Single Mode Laser, bestehend aus 21 einzelnen Fasern, die zu sieben Modulen mit je drei Fasern zusammengefasst sind. Eine der 21 Fasern gibt dabei die Eigenschaften vor.

Die Anlage verfügt über einige konstruktive Besonderheiten, wie eine aktive Schutzeinhausung und eine ultraschnelle Strahlablenkung durch einen Polygonscanner, was allerdings im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung findet. Neben dem Polygonscanner steht ein Scannersystem der Firma Raylase zur Verfügung.

Abbildung 9: YLR 3000 SM

4.1.3 Scannersystem



Abbildung 11: Raylase Superscan-SC-30

Bei diesem Scannersystem (Abbildung 11) handelt es sich um ein Produkt der Firma Raylase, das als Spezialanfertigung für die Hochschule Mittweida angefertigt wurde. Unter dem Begriff Superscan führt Raylase 2-Achsen-Laserstrahl-Ablenkeinheiten mit hohen Ablenkgeschwindigkeiten, Langzeitstabilität und niedrigen Driftwerten, was für die Genauigkeit insbesondere bei der Mikrobearbeitung eine große Bedeutung hat.

Der hier eingesetzte Scanner ist ein wassergekühlter lowdrift-Scanner mit Silicium-Carbit-Substrat (SiC), der aus zwei Galvanometerspiegeln und einer F-Theta-Optik aufgebaut ist (Abbildung 10).

Die Größe des Scanfeldes ist abhängig von der Brennweite der eingesetzten Optik. Für die Probenpreparation wurde beispielsweise eine Optik mit 330 mm Brennweite genutzt, um die Keramikplatten der Abmessung 113 x 113 mm² ohne Verfahren des Tisches bearbeiten zu können.

Die Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl wird hier über ein Hybridsystem realisiert. Ein zweieinhalb-Achssystem erlaubt die Auslenkung eines Tisches in X- und Y-Richtung, sowie das Verfahren einer z-Achse, an der die Optik samt Scannersystem befestigt ist. Die Steuerung des Scanners erfolgt mit der Software LasPaint. Die Bewegung entlang der Z-Achse wird mit Hilfe der NView HMI Steuerung von Aerotech realisiert.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist es besonders wichtig vor Beginn der Untersuchungen eine Leistungsmessung durchzuführen. Dabei erreicht die eingestellte Leistung, u. a. durch Absorptionsverluste, das Werkstück nie in voller Höhe. Die Leistungsmessung erfolgte mit dem Messgerät Primes Power Monitor bei eingesetzter Optik mit 230 mm Brennweite. Bei der Messung waren alle sieben Lasermodule intakt.

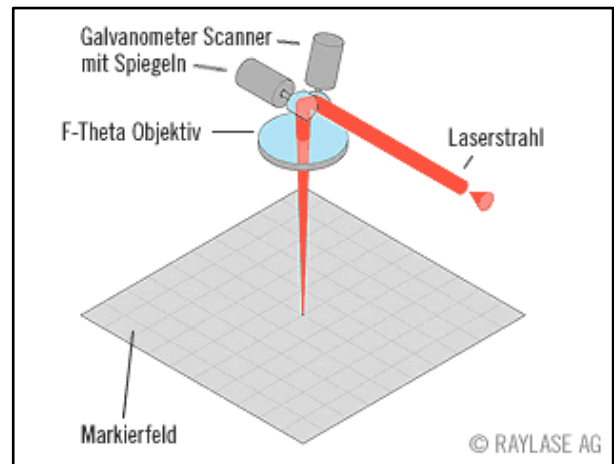


Abbildung 10: Schematischer Aufbau²²

²² URL: < http://www.raylase.com/de/product_subhome.php?n1=2&n2=1>, Stand: 01.06.2010

Tabelle 2Tabelle 7 zeigt die gemessenen Leistungswerte. Die erste Spalte ist dabei die eingestellte Leistung, die zweite Spalte ist der von der Anlage korrigierte Leistungswert, der z. B. aufgrund der Alterung der Pumpdioden niedriger ist, die dritte Spalte zeigt die jeweilige Stromstärke. Die vom Messgerät detektierten Leistungen sind in der Spalte 4 dargestellt.

Die vom Hersteller während der Wartung aufgenommenen Messwerte wurden direkt am Laserge­rät gemessen und sind somit exklusive der Absorptionsverluste in Strahlengang und Optik. Die beiden rechten Spalten setzen die reale, gemessene Leistung mit der eingestellten bzw. der während der Wartung gemessenen ins Verhältnis.

eingestellte Leistung in W	ausgegebene Leistung in W	Stromstärke in %	gemessene Leistung in W	Leistung (IPG Mes-sung) in W	Reale Lei-stung/eingest. Lei-stung	Reale Lei-stung / IPG-Messung
80	120	10	107	-	1,338	-
470	460	20	393	473	0,836	0,83
800	780	30	660	781	0,825	0,85
1120	1100	40	930	1097	0,830	0,85
1435	1400	50	1205	1417	0,840	0,85
1750	1700	60	1480	1740	0,846	0,85
2075	2000	70	1765	2060	0,851	0,86

Tabelle 7: Leistungsmessung mit dem Primes Power Monitor

Bei dieser Messung wurde der volle Leistungsrahmen der Anlage ausgeschöpft. Das Diagramm 1 zeigt, dass auch bei hohen Leistungen eine lineare Abhängigkeit besteht. Das ermöglicht eine einfache Berechnung der tatsächlichen Leistung.

Bei einer Stromstärke von ca. 10% sind die Messwerte stark fehlerbehaftet. Möglicherweise liegt das darin begründet, dass die Laseranlage vom Hersteller bei einer Leistung von 300 W kalibriert wurde. Eine weitere Problematik lag darin, dass während des Bachelorprojekts wiederholt Module der Laseranlage ausfielen und bei den Wartungsarbeiten des Herstellers neben dem Modulwechsel auch eine Anpassung der vom Gerät ausgegebenen Leistung durchgeführt wurde.

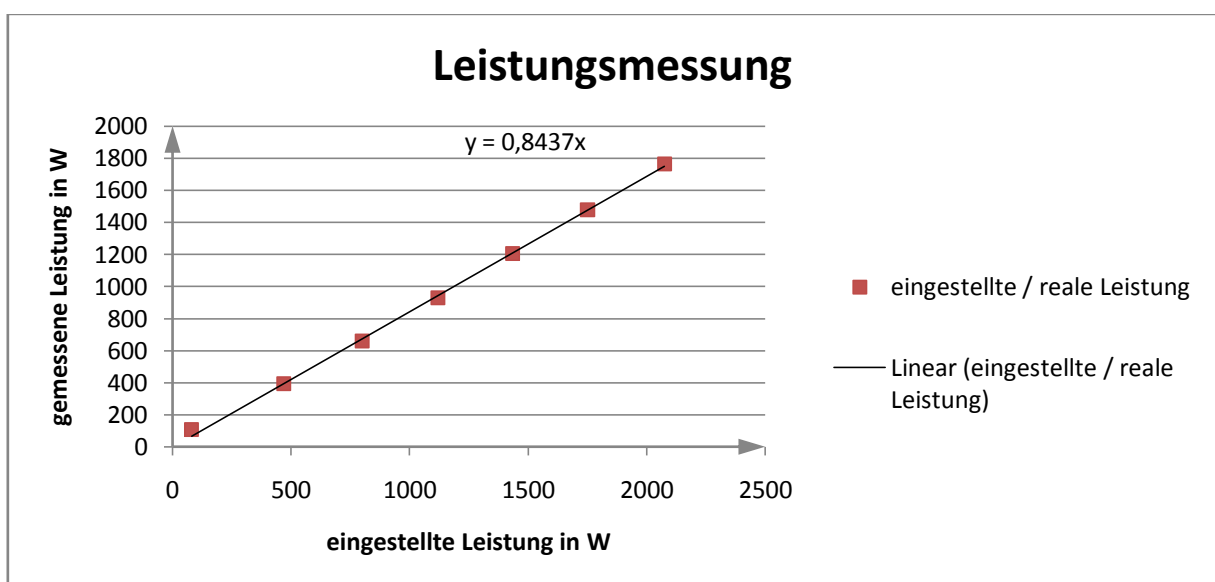


Diagramm 1: Leistungsmessung mit Optik (230 mm Brennweite)

Im Diagramm ist die lineare Abhängigkeit zwischen gemessener und eingestellter Leistung erkennbar. Durch die Regression kann die Funktion der die Messwerte folgen ermittelt werden. Im Mittel erreichen demzufolge 84,4% der eingestellten Leistung tatsächlich das Werkstück, wenn alle sieben Lasermodule funktionstüchtig sind.

4.2 Messtechnik

4.2.1 EDX- und REM-Analyse

Die energiedispersive Röntgenspektroskopie wurde mit einem Gerät des Typs QUANTAX der Firma Bruker AXS Microanalysis GmbH durchgeführt. Das Gerät, bestehend aus einem Windows-Rechner, QUANTAX-Hardware, Röntgendetektor, Signalelektronik und einem I/O-Adapter mit integriertem Rastergenerator, ist mit einem Rasterelektronenmikroskop der Bezeichnung JSM-6510LV des Herstellers JEOL kombiniert. Das REM arbeitet mit Wolfram- oder LaB_6 -Kathode und verfügt über eine integrierte Niedervakuumsteuerung, die es erlaubt den Druck in der Probenkammer zu variieren. Dieser Low-Vacuum-Betrieb (LV) ermöglicht die Untersuchung von Proben mit hohem Wassergehalt und nicht-leitender Oberfläche.

Das war in diesem Fall aufgrund der schlechten elektrischen Leitfähigkeit von Aluminiumoxidkeramik von großer Bedeutung. Datenblatt des Herstellers II Tabelle 17 im Anhang zeigt einige Angaben des Herstellers zu diesem Rasterelektronenmikroskop.

4.2.2 Prüfmaschine Zwick

Die im Stumpfstoß geschweißten Proben sollten mit einer statischen Materialprüfmaschine des Typs 1445 der Firma Zwick GmbH & Co. auf ihre Festigkeit untersucht werden. Die Maschine wurde durch einen eigens für die Untersuchungen konstruierten Aufsatz für einen 4-Punkt-Biegebruch-Versuch erweitert.

Der Messbereich des verwendeten Kraftaufnehmers umfasst ein Intervall zwischen 0,8 und 200 N. Die relative Abweichung zwischen Maschinenanzeige und tatsächlichem Kraftwert wurde bei der Kalibrierung mit minimal 0,05% und maximal 0,21% ermittelt.

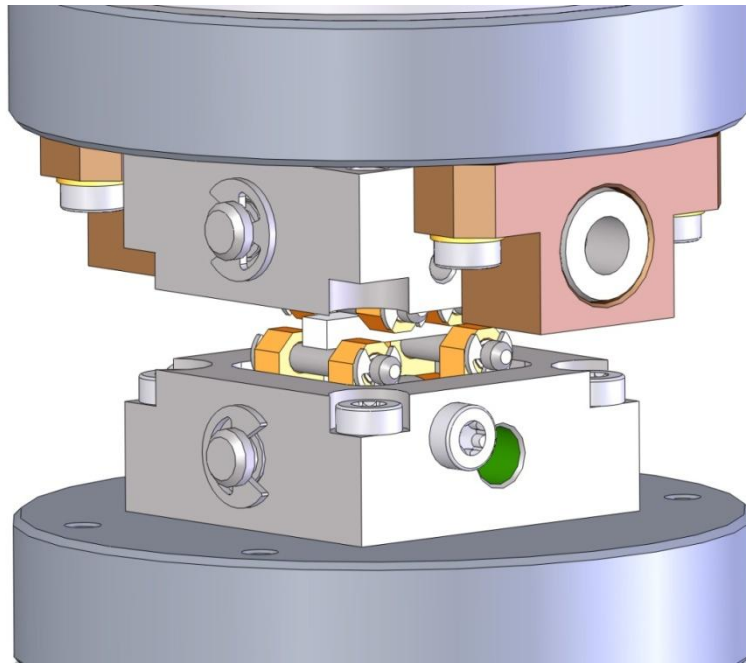


Abbildung 12: Grafik des Aufsatzes zum 4-Punkt-Biegebruchversuch

Abbildung 12 zeigt eine schematische Darstellung des Aufsatzes für den 4-Punkt-Biegebruch-Versuch mit eingelegter Probe. Bei dieser Prüfmethode liegt die Probe auf zwei Auflagen und wird durch einen Prüfstempel mit zwei Lagern, die als Druckpunkte fungieren, von der entgegengesetzten Seite mit je $F/2$ belastet.

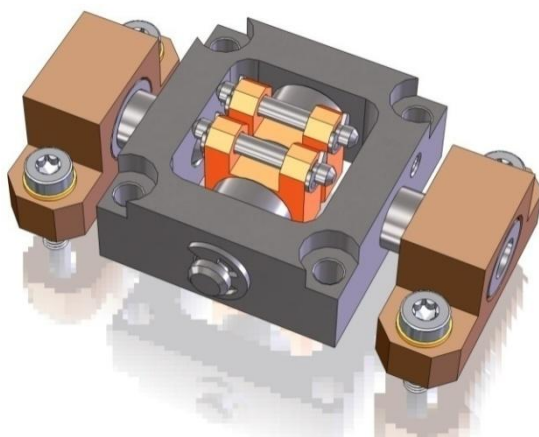


Abbildung 13: Detaildarstellung

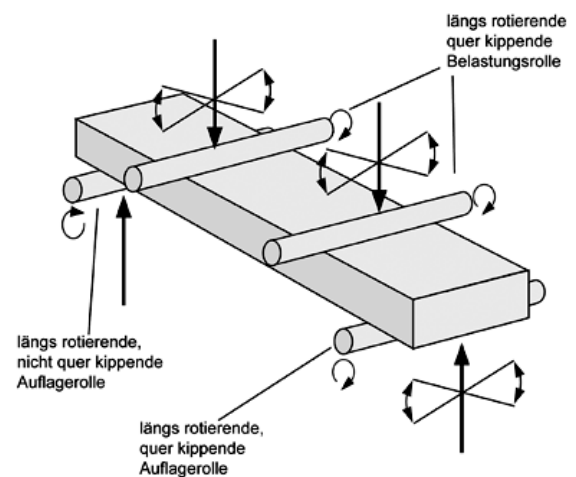


Abbildung 14: Freiheitsgrade der Lager²³

In Abbildung 13 wird der untere Prüfstempel im Detail dargestellt. In der Mitte sieht man die zwei Stifte, die als Auflage dienen. Im oberen Prüfstempel sind ebenfalls Stifte eingefasst, die den Druck auf die Probe ausüben. Das Ziel der Prüfung ist, dass die Probe an der schwächsten Stelle bricht. Aus diesem Grund ist es besonders bei sprödharten Werkstoffen wie Keramiken notwendig die Druck- und Auflagepunkte so zu gestalten, dass die Probe nicht an diesen Stellen bricht. In Abbildung 14 ist schematisch dargestellt, wie diese Problematik beim 4-Punkt-Biegebruchversuch gelöst wurde, indem die Lager verschiedene Freiheitsgrade besitzen.

²³ URL: <<http://www.zirkondioxid.de/uploads/pics/4-Punkt-Biegeversuch.gif>>, Stand: 04.06.2010

4.2.3 Digitales Lichtmikroskop

Als Lichtmikroskop diente das digitale VHX-100 der Firma Keyence, das 20- bis 500-fache Vergrößerungen ermöglicht. Auf diese Weise konnten die Mikroskopaufnahmen der Proben als digitale Bilddatei gespeichert und vermessen werden.

4.2.4 Probenpreparation

Die Probenpreparation erfolgte durch Kalteinbetten mit zwei Komponenten, Epoxidharz und Härter, die präzise nach Gewicht abgemessen und vermischt werden. Da Keramiken eine poröse Oberfläche besitzen, wurden die befüllten Einbettformen vakuumimprägniert. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass das Epoxidharz auch in Hohlräume eindringt und das spröde Material dadurch festigt. Ausbrüche, Risse oder geschlossene Poren, die beim Schleifen und Polieren entstehen, können so minimiert werden.²⁴

Die eingebetteten Proben wurden mit Schleif- und Polierscheiben der Firma Struers und nach deren Empfehlung bearbeitet (Tabelle 8).

Vorgang	Planschleifen	Feinschleifen		Polieren		Optional
Scheibe	MD-Piano 220	MD-Piano 1200	MD-Largo	MD-Dac	MD-Nap	MD-Chem
Abrasivmittel / Lubrikant	Wasser	Wasser	9µm	3µm	1µm	OP-S
Drehzahl [U/min]	300	300	150	150	150	150
Kraft [N]	35	35	35	30	25	25
Richtung	>>	>>	>>	>>	>>	><
Zeit [min]	1	2	10	8	2	1 mit OP-S, 1 mit Wasser

Tabelle 8: Parameter zum Schleifen und Polieren der Proben

²⁴ URL: < http://www.struers.de/default.asp?top_id=5&main_id=51&sub_id=78&doc_id=281>, Stand: 04.06.2010

5 Experimenteller Teil

5.1 Blindschweißungen

5.1.1 Versuchsaufbau

Im ersten Teil der Untersuchungen sollte mit Hilfe von Blindschweißungen ein Parameterfenster ermittelt werden, in dem ein Schweißprozess möglich ist. Dafür wurde zunächst vor jeder Versuchsreihe die Fokusslage ermittelt. Als Fokusslage ist die Ebene mit dem kleinsten Radius in der Strahlkaustik definiert, in dieser Ebene ist die Intensität der Laserstrahlung am höchsten.

Für die Blindschweißungen wurden die Substrate zunächst in der gewünschten Größe durch Ritzen und Brechen mittels cw-Laserstrahlung hergestellt. Die einzelnen Proben wurden auf zwei Auflegern aus Al_2O_3 -Keramik gelagert, um unerwünschte Effekte beispielsweise beim Durchschweißen oder durch Wärmeableitung zu vermeiden. Auch unterhalb der zu schweißenden Probe wurde eine keramische Abdeckung genutzt, da der Einfluss der am metallischen Werkstück rückreflektierten Strahlanteile minimiert werden sollte (siehe Abbildung 15). Der gesamte Aufbau befand sich auf einem x-y-Koordinatentisch.

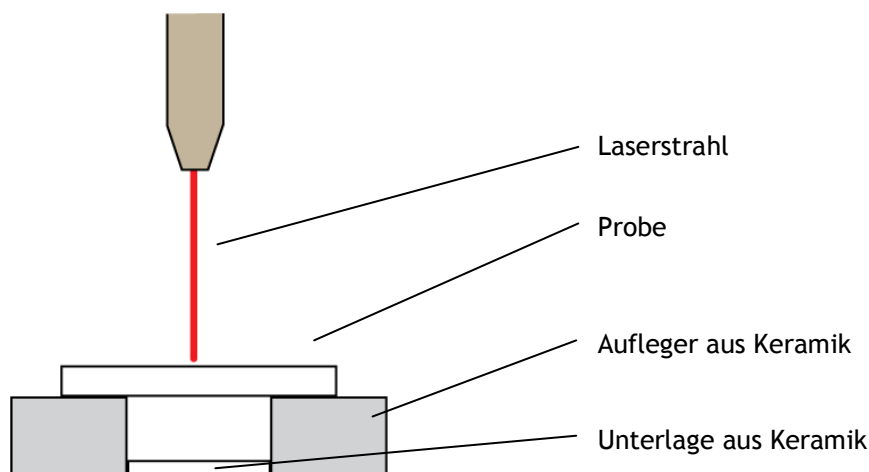


Abbildung 15: Versuchsanordnung

5.1.2 Untersuchte Parameter

Für die Blindschweißungen wurden verschiedene Parameter variiert. Neben der Laserleistung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit wurde unter anderem auch der Einfluss der Fokusslage, der Brennweite der verwendeten Optik, der Nahtlänge und der Anzahl an Überfahrten untersucht. Vorangegangene Versuchsreihen ergaben, dass der Schweißprozess ab einer Geschwindigkeit von mehr als einem Meter pro Sekunde vom Schneidprozess abgelöst wird. Diese Geschwindigkeit wurde somit als obere Prozessgrenze ermittelt. Bei den ersten Versuchen wurde der volle Leistungsrahmen der Anlage ausgeschöpft. Die hohen Leistungen von mehr als 1000 W stellten sich als ungeeignet für den Schweißprozess heraus. Dabei wurden keine Schweißverbindungen erzielt, die Substrate waren teilweise stark braun angelaufen und zersprungen. Leistungen zwischen 80 W und 300 W erwiesen sich als günstiges Leistungsintervall. Dabei ist die untere Grenze die minimale Leistung, bei der die Laseranlage stabil betrieben werden kann.

Es ist nicht auszuschließen, dass mit Laserleistungen außerhalb dieses Intervalls gute Ergebnisse erzielt werden können. Werkstoffseitig wurde neben dem Reinheitsgrad des Materials auch die Substratdicke variiert.

Optik mit 500 mm Brennweite

Für die erste Versuchsreihe wurde eine Optik mit 500 mm Brennweite und die 96%ige Keramik der Dicke zwei Millimeter verwendet. Bei dieser Optik wird ein Fokusdurchmesser zwischen 42 bis 46 μm erreicht. Bei Leistungen von nominal 300, 250 und 200 Watt wurde die Bearbeitungsgeschwindigkeit schrittweise variiert. Je Probe wurden drei Spuren mit dem gleichen Parametersatz erzeugt. Dabei wurde zwischen den Schweißnähten eine Wartezeit von 20 Sekunden eingehalten, um eine Beeinflussung durch einen Wärmestau im Material zu verringern.

Als Messwert wurde neben der Einschweißtiefe, die Querschnittsfläche der Schweißnaht, deren Umfang und die Breite der Naht ermittelt.

Nr.	VR1_1A	VR1_1B	VR1_1C	VR1_2A	VR1_2B	VR1_2C	VR1_3A	VR1_3B	VR1_3C
P [W]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	40	40	40	50	50	50	75	75	75
A [mm ²]	0,114	0,127	0,126	0,103	0,088	0,091	0,065	0,068	0,070
h [mm]	1,930	1,932	1,937	1,918	1,872	1,930	1,607	1,608	1,563
b [mm]	0,051	0,047	0,063	0,034	0,023	0,061	0,041	0,040	0,048

Nr.	VR1_4A	VR1_4B	VR1_4C	VR1_5A	VR1_5B	VR1_5C
P [W]	250	250	250	200	200	200
v [mm/s]	40	40	40	40	40	40
A [mm ²]	0,111	0,127	0,113	0,101	0,083	0,152
h [mm]	1,543	1,583	1,603	1,314	1,328	1,413
b [mm]	0,083	0,082	0,078	0,072	0,055	0,119

Tabelle 9: Messdaten der Versuchsreihe VR1

Tabelle 9 zeigt die Messwerte der ersten Versuchsreihe in der Übersicht. Wie auch im Diagramm 2 erkennbar ist, nimmt die Tiefe der Schweißnaht erwartungsgemäß mit zunehmender Geschwindigkeit ab, die die Streckenenergie verringert wird. Bei der Bearbeitungsgeschwindigkeit von 40 mm/s wurde eine Durchschweißung der Probe erreicht, deren Dicke vom Hersteller mit 2 mm angegeben wird.

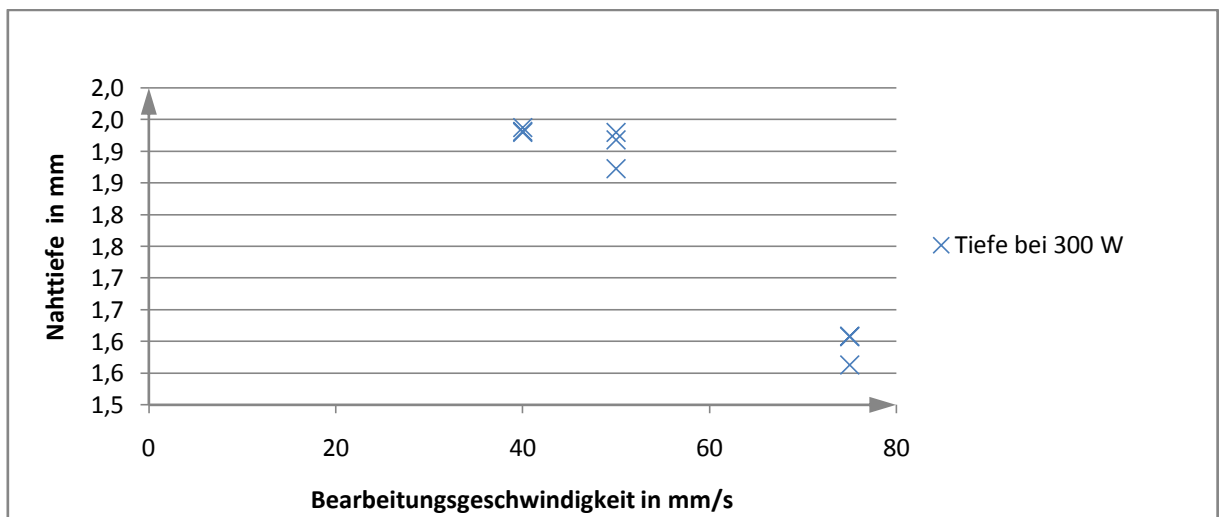


Diagramm 2: Nahttiefe bei 300 W

In Abbildung 16 sind ausgewählte Querschliffe der erzeugten Blindschweißungen dargestellt. Durch die lange Brennweite der Optik sind tiefe Schweißnähte mit geringer Breite und nahezu parallelen Wänden entstanden. Bereits bei dieser Vergrößerung sind verschiedene Graustufen im Bereich der erstarrten Schmelze erkennbar, die auf Inhomogenitäten im Material hindeuten. Bei einigen Abbildungen, wie beispielsweise bei VR1_1B, deutet sich eine gewölbte Ablagerung von Schmelze an der Oberseite der Keramikprobe an. Die Ursache dafür, das sogenannte Humping, bezeichnet eine insbesondere bei hohen Schweißgeschwindigkeiten auftretende Schmelzbaddynamik, die zu unerwünschten periodischen Nahtüberhöhungen und Nahtfehlstellen führt.

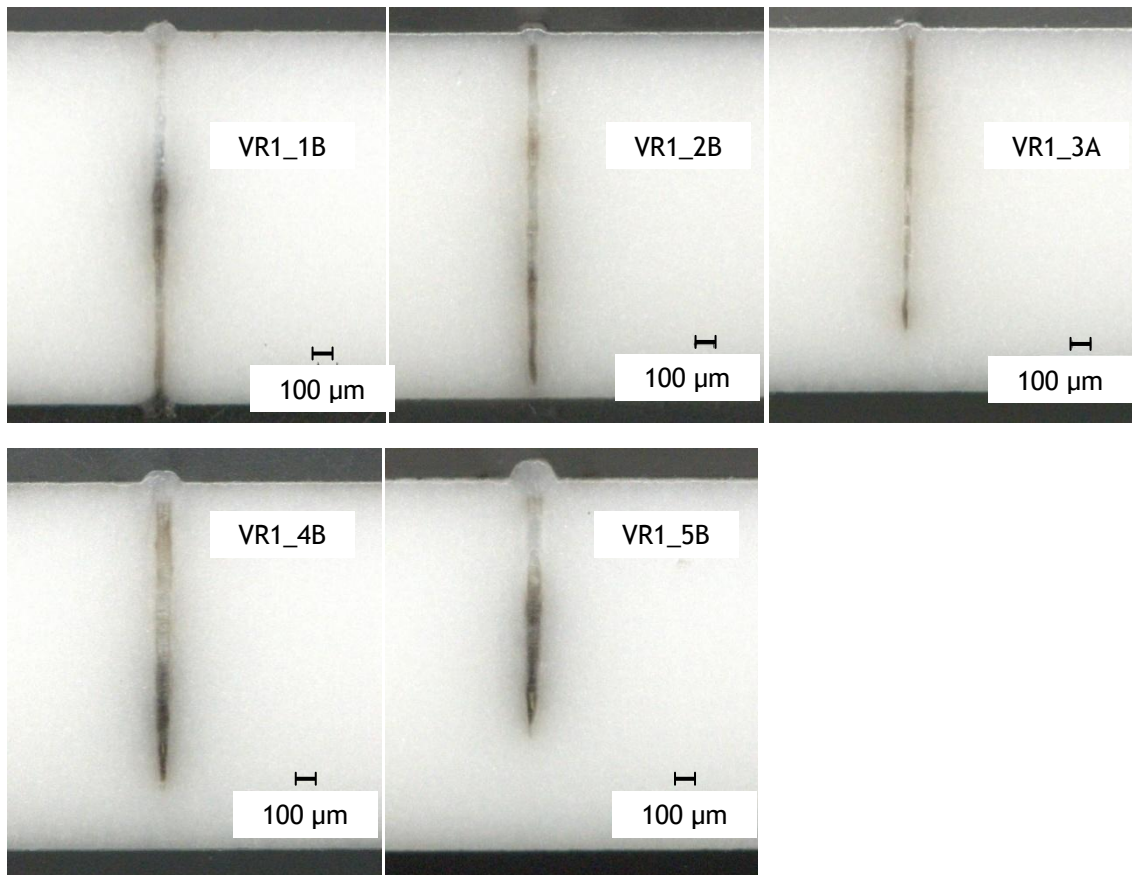


Abbildung 16: Querschliffe der Schweißnähte aus Versuchsreihe 1

Erhöht man den Kontrast der Aufnahmen, sind bereits bei dieser Vergrößerung Risse im Material erkennbar (siehe Abbildung 17).

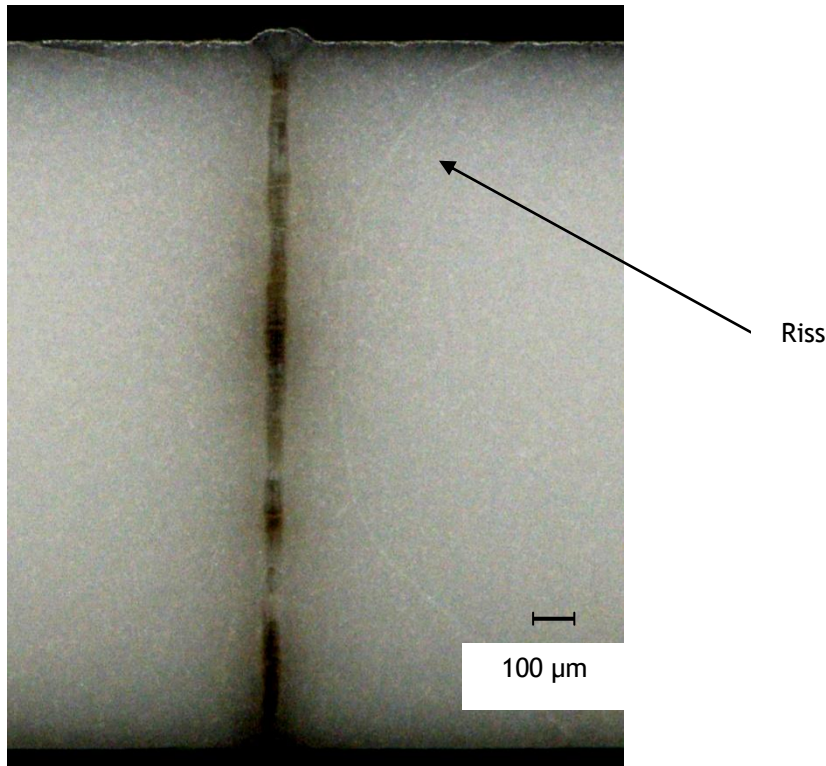


Abbildung 17: Schweißnaht VR1_1A

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Leistung auf konstant 300 W eingestellt und das untersuchte Geschwindigkeitsintervall vergrößert. In Schritten von 25 mm/s wurde die Bearbeitungsgeschwindigkeit von 50 bis auf 200 mm/s erhöht. Auf diese Weise wird die Streckenenergie schrittweise verringert und es wurde ein Substrat mit nur 1,25 mm Dicke gewählt, da geringere Einschweißiefen erwartet wurden.

Nr.	VR2_1	VR2_2	VR2_3	VR2_4	VR2_5	VR2_6	VR2_7
P [W]	300	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	50	75	100	125	150	175	200
A [mm ²]	0,083	0,090	0,064	0,054	0,046	0,038	0,022
h [mm]	1,229	1,251	1,113	0,849	0,650	0,604	0,499
b [mm]	0,059	0,057	0,056	0,057	0,068	0,063	0,072

Tabelle 10: Mittelwerte der je drei Messungen pro Parameterkombination

Je Parameterkombination wurden erneut drei Schweißnähte erzeugt, die eingebettet, geschliffen und mittels digitalen Lichtmikroskops vermessen wurden. In Tabelle 10 sind jeweils die Mittelwerte der drei Messungen dargestellt. Die vollständigen Messwerte sind im Anhang in Tabelle 18 aufgelistet.

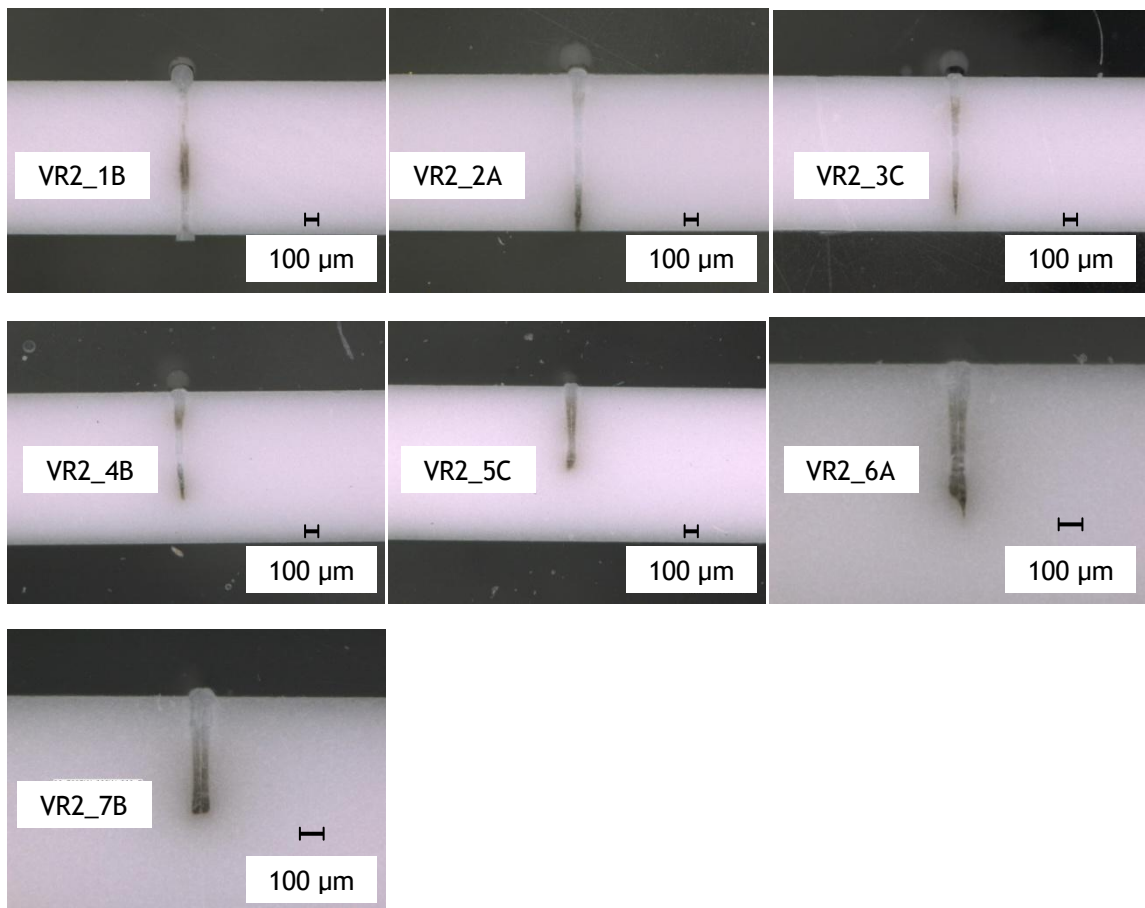


Abbildung 18: Querschliffe der Versuchsreihe 2 (300 W, variierte Geschwindigkeit)

Die Querschliffe in Abbildung 18 zeigen jeweils eine der pro Parameterkombination erzeugten Schweißnähte. Man erkennt, dass die Einschweißtiefe erwartungsgemäß mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Auch bei dieser Versuchsreihe ist der Humping-Effekt erkennbar. Auf den Bildern VR2_1B bis VR2_5C sind schemenhafte, kugelförmige Ablagerungen erkennbar. Das hängt damit zusammen, dass die Nahtüberhöhungen periodisch auftreten und die Querschliffe nur eine Schicht im Material abbilden. Bei der verwendeten Vergrößerung des digitalen Lichtmikroskops ist die Schärfentiefe jedoch noch groß, dass die tiefer im Einbettmaterial liegenden Nahtüberhöhungen sichtbar sind. Die Versuchsreihe macht deutlich, dass auch bei höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten und damit geringerer Streckenenergie Inhomogenitäten und Risse auftreten.

Abbildung 19 zeigt, dass eine starke Nahtüberhöhung auch Hohlräume in der Schweißnaht verursachen kann. Die genannten Phänomene verringern die Festigkeit der Schweißverbindung und sind daher unerwünscht.

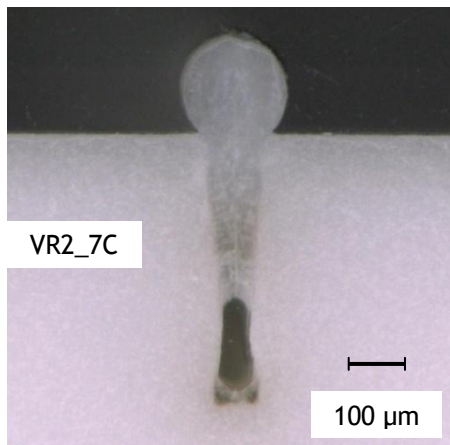
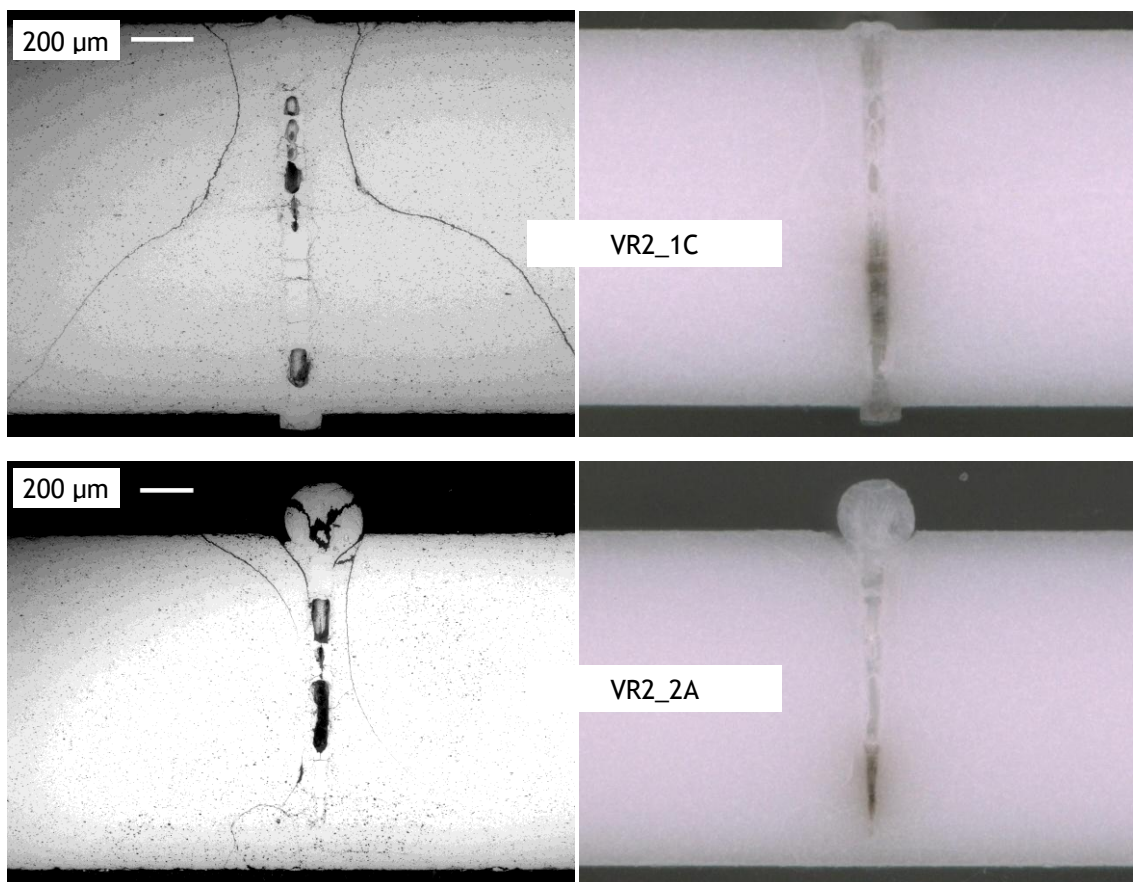


Abbildung 19: Hohlraum in Naht

Als problematisch beim Auswerten der Querschliffe mittels digitalen Lichtmikroskops erwies sich die Detektion von Spalten und Rissen im Material. Zum Vergleich wurden von einigen Spuren Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop gemacht. Der Vorteil hierbei ist der bessere Kontrast, der die Strukturen deutlicher erkennbar macht.



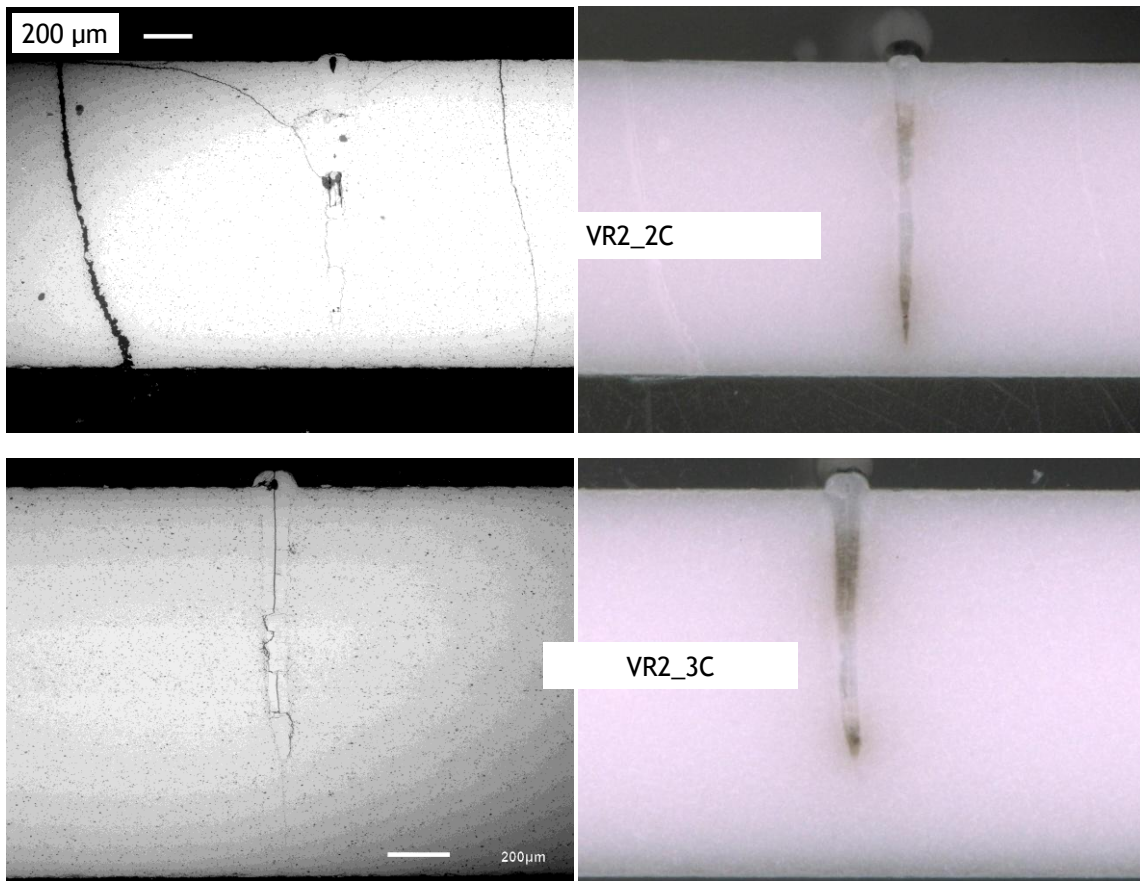


Abbildung 20: Vergleich von REM- und digitaler Mikroskopaufnahmen

Die Bilder in Abbildung 20 zeigen jeweils die gleiche Blindschweißnaht, links mit dem Raster-elektronenmikroskop und rechts mit dem digitalen Lichtmikroskop aufgenommen. Beide Aufnahmen sind jeweils im gleichen Maßstab dargestellt. In der ersten Reihe sieht man deutlich den Unterschied zwischen den Aufnahmen. Während die Schweißnaht unter dem Lichtmikroskop lediglich inhomogen erscheint, da innerhalb des Bereichs der erstarrten Schmelze verschiedene Grautöne erkennbar sind, ist auf der linken Aufnahme deutlich erkennbar, dass das Substrat auf beiden Seiten der Spur gerissen ist. Auch im Nahtinneren kann man Risse und Hohlräume erkennen.

In der zweiten und dritten Reihe kann man ebenfalls deutliche Risse erkennen, die man auf den lichtmikroskopischen Aufnahmen bestenfalls erahnen kann. In der vierten Bildreihe ist das Substrat rissfrei, dafür sind hier die Erstarrungsfronten im Nahtinneren deutlich sichtbar.

Optik mit 230 mm Brennweite

Da mit der verwendeten Optik keine rissfreien Blindschweißungen erzeugt werden konnten, wurde eine weitere Versuchsreihe mit einer Optik kürzerer Brennweite durchgeführt. Durch die damit verbundene stärkere Divergenz der Strahlkaustik ist zu erwarten, dass die Parallelität der Schweißnahtwände nicht mehr erreicht werden kann. Allerdings wird mit der kürzeren Brennweite gemäß der Beziehung

$$w_0 = 0,61 \cdot \frac{\lambda \cdot f}{w_{vor}}$$

ein kleinerer Fokusbereich erreicht. Möglicherweise bewirkt der Energieeintrag auf einer kleineren Fläche, dass sich nur geringe thermische Spannungen ausbilden und somit einer Rissbildung im Material entgegen gewirkt wird.

Die Optik besitzt eine Brennweite von 230 mm, der Fokusbereich beträgt bei dieser Optik ca. 21 µm. Für diesen Teil der Untersuchungen wurden Keramikproben aller drei Reinheitsgrade verwendet.

99,6%ige Al₂O₃-Keramik

Zu Beginn wurde die 99,6%ige Aluminiumoxidkeramik der Dicke 1 mm verwendet. Innerhalb des zuvor ermittelten Parameterfensters wurden verschiedene Prozessgrößen variiert. Bei den nominalen Leistungen von 200, 250 und 300 W wurde ein Geschwindigkeitsintervall zwischen 15 mm/s und 75 mm/s untersucht. Obwohl mehrere Proben für jede Parameterkombination genutzt wurden, konnten lediglich von zwei Varianten Querschliffe angefertigt werden (Siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Das hochreine Material stellte sich als äußerst anfällig für Rissbildung heraus und zerbrach bei den meisten Versuchen in schollenartige Stücke. Als besonders kritisch erwies sich die Probenpräparation, da die Substrate zur Fixierung in Clip-Halterungen gespannt wurden, die ein Verrutschen beim Befüllen mit Epoxidharz verhindern sollten. Die Schweißverbindungen waren so instabil, dass ein Großteil während der Einspannung zerbrach. Die Versuche wurden wiederholt, jedoch konnten auch danach nur fünf Schweißnähte erfolgreich eingebettet und geschliffen werden. Die Messwerte dieser Blindschweißungen sind der Tabelle 11 zu entnehmen. Überlegungen die Versuchsreihen ein weiteres Mal zu wiederholen wurden verworfen, da die Festigkeit der Schweißverbindungen offensichtlich keinen industriellen Anforderungen genügen würde. Aus diesem Grund wurden lediglich die Schliffe und Messwerte der fünf Spuren ausgewertet.

Nr.	VR3_1A	VR3_1B	VR3_1C	VR3_2A	VR3_2B
P [W]	300	300	300	300	300
v [mm/s]	15	15	15	50	50
A [mm ²]	0,086	0,131	0,134	0,080	0,077
h [mm]	0,983	0,980	0,974	0,984	0,988
b [mm]	0,099	0,119	0,118	0,065	0,068

Tabelle 11: Messwerte der Versuchsreihe 3 an 99,6%iger Keramik

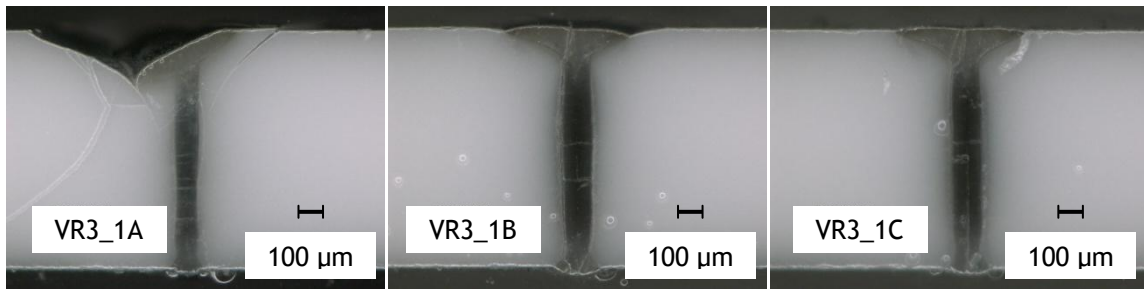


Abbildung 21: Blindschweißung an 99,6%iger Al_2O_3 -Keramik bei 300W und 15 mm/s

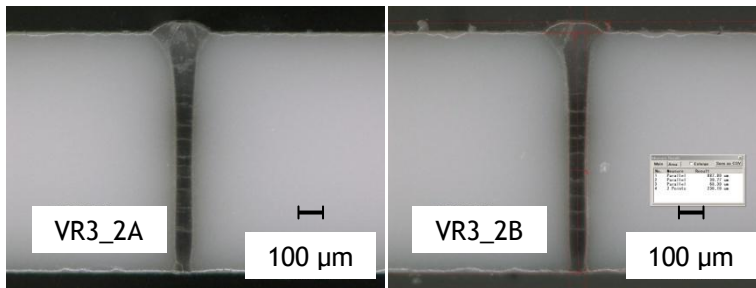


Abbildung 22: Blindschweißung an 99,6%iger Al_2O_3 -Keramik bei 300W und 50 mm/s

Die Abbildungen Abbildung 21 und 22 zeigen die Blindschweißungen bei 300 W eingestellter Laserleistung und 15 bzw. 50 mm/s Bearbeitungsgeschwindigkeit. Es wurden wie zuvor je Probe drei Blindschweißungen nebeneinander gesetzt, die Wartezeit zwischen den einzelnen Spuren wurde auf 30 Sekunden erhöht, um einen Wärmestau zu vermeiden. Das Bild VR2_1A zeigt ein häufiges Verhalten der 99,6%igen Keramik. Starke Rissbildung und herausgeplatzt Material, sowie periodisch auftretende Querrisse im Bereich der wiedererstarrten Schmelze sind typische Phänomene, die bei der Bearbeitung auftraten. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte in der Zusammensetzung der Keramik liegen. Bei dieser hochreinen Keramik handelt es sich, wie bei den beiden anderen Materialien auch, um einen polykristallinen Werkstoff. Das Material wird durch den Energieeintrag mittels Laserstrahlung aufgeschmolzen und erstarrt im Anschluss wieder. Im Gegensatz zu den beiden anderen Werkstoffen sind in der 99,6%igen Keramik sehr wenig Zuschlagstoffe bzw. Verunreinigungen enthalten, die beim Erstarrungsprozess als Keime für das Kornwachstum fungieren. Möglicherweise entsteht dadurch ein Bereich polykristallinen Materials mit einer wesentlich größeren durchschnittlichen Korngröße und damit einer geringeren Festigkeit. Die durch den Temperaturgradienten erzeugten Spannungen im Material bauen sich in Form von Rissen ab, die sich bevorzugt entlang der Korngrenzen fortsetzen. Bei grobkörnigem Material wird diese Rissfortpflanzung begünstigt.

Es konnte für die Aluminiumoxidkeramik mit dem Reinheitsgrad 99,6% keine Parameterkombination ermittelt werden, bei der rissfreie, stabile Blindschweißungen erzeugt wurden. Das Material ist unter den untersuchten Bedingungen für den gewünschten Zweck nicht geeignet. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Versuche mit der hochreinen Keramik durchgeführt.

96%ige Al₂O₃-Keramik

Die für die Versuche verwendete 96%ige Al₂O₃-Keramik besitzt laut Herstellerangabe eine Dicke von 0,77 Millimetern. Da bei der Versuchsreihe 1 bereits eine Aluminiumoxidkeramik desselben Reinheitsgrads eingesetzt wurde, erfolgte die Auswahl der Parameterintervalle von Laserleistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der bereits erzielten Ergebnisse. So wurde die Laserleistung lediglich zwischen 150 und 300 W variiert, da bei höheren Leistungswerten ein Anlaufen des Materials und Risse bis hin zum Zerplatzen des Substrats auftraten. Unterhalb der gewählten Leistungsgrenze sind die gewünschten Einschweißiefen nicht realisierbar. Der Tiefschweißprozess wird zudem bei zu niedrigen Intensitäten von einem Wärmeleitschweißprozess abgelöst. Für einen stabilen Laserprozess muss bei dieser Anlage zudem eine Stromstärke von mindestens zehn Prozent des Maximalwerts eingestellt werden. Das entspricht einem Leistungswert von ca. 80 W. Unterhalb dieser Leistungsgrenze wird ein Betrieb der Anlage nicht empfohlen.

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit wurde zwischen 20 und 50 mm/s variiert, da bei den vorangegangenen Untersuchungen die günstigsten Ergebnisse in diesem Bereich erzielt wurden.

Mit jeder Parameterkombination wurden drei Blindschweißnähte erzeugt, die eingebettet, geschliffen und mit dem digitalen Lichtmikroskop ausgewertet wurden. Tabelle 12 zeigt aus Gründen der Übersichtlichkeit nur jeweils das arithmetische Mittel der Messwerte der erzeugten Schweißungen. Die vollständigen Messwerte sind in Tabelle 19 im Anhang dargestellt. Bei der Parameterkombination VR4_8 konnten die Mittelwerte lediglich aus den Messwerten zweier Schweißnähte ermittelt werden, da die dritte Spur während der Bearbeitung zersprungen ist. Der Mittelwert ist aus statistischer Sicht stets kritisch zu hinterfragen, da er zwar eine gute Orientierung bietet, aber durch extreme Messwerte auch stark verfälscht wird. Da das Bruchverhalten sprödharter Werkstoffe der Weibull-Verteilung folgt, müssten wesentlich mehr Versuche zu jeder Parameterkombination durchgeführt werden, um eine Aussage treffen zu können, die statistisch valide ist. Innerhalb des zeitlichen Rahmens der Bachelorarbeit war dies jedoch nicht umsetzbar.

Nr.	VR4_1	VR4_2	VR4_3	VR4_4	VR4_5	VR4_6
P [W]	150	150	150	150	200	200
v [mm/s]	20	30	40	50	20	30
A [mm ²]	0,092	0,068	0,059	0,054	0,110	0,082
h [mm]	0,764	0,761	0,751	0,753	0,767	0,757
b [mm]	0,109	0,083	0,078	0,064	0,120	0,092

Nr.	VR4_7	VR4_8	VR4_9	VR4_10	VR4_11	VR4_12
P [W]	200	200	300	300	300	300
v [mm/s]	40	50	20	30	40	50
A [mm ²]	0,080	0,063	0,116	0,092	0,071	0,073
h [mm]	0,765	0,769	0,753	0,775	0,765	0,765
b [mm]	0,099	0,069	0,112	0,094	0,084	0,081

Tabelle 12: Mittelwerte der Messungen der Versuchsreihe 4

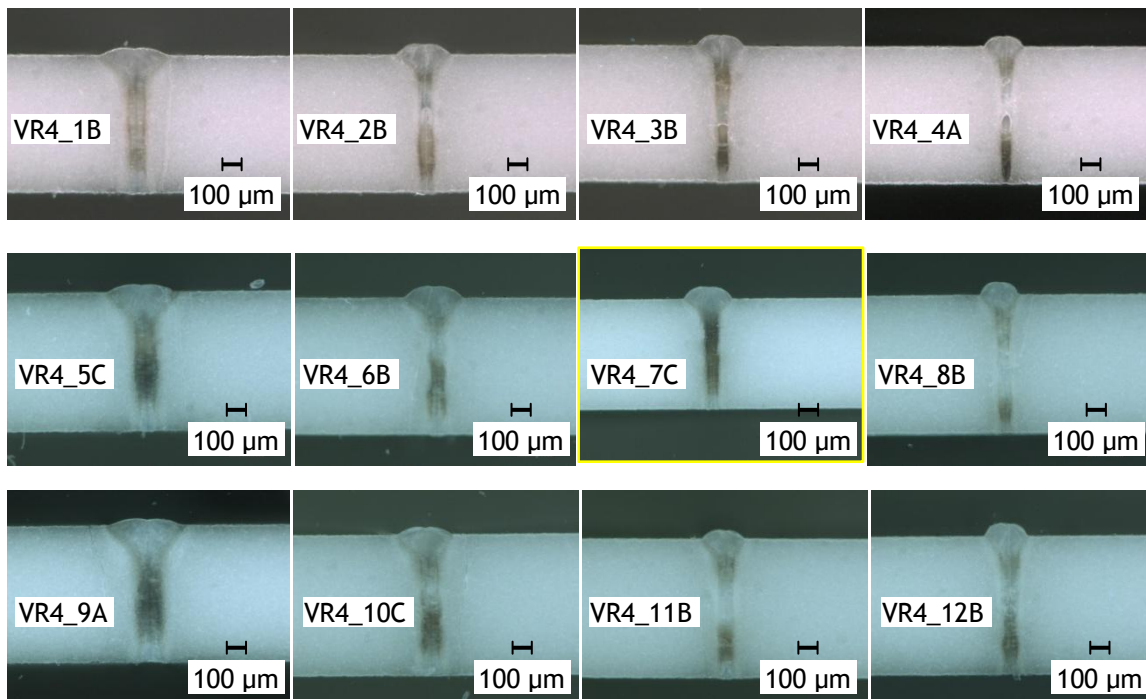


Abbildung 23: Blindschweißungen an 96%iger Al_2O_3 -Keramik

Die visuelle Auswertung der Versuchsreihe 4 mit Hilfe des digitalen Lichtmikroskops ergab, dass es auch bei diesen Parameterkombinationen und der Optik mit 230 mm Brennweite zu Rissen und Inhomogenitäten kommt. Abbildung 23 zeigt jeweils eine der drei unter gleichen Bedingungen erzeugten Spuren. Wie bereits bei der Versuchsreihe 3 weisen die Schweißnähte auch hier im oberen Bereich eine starke Verbreiterung auf. Bei allen untersuchten Parametern wurde das Substrat durchgeschweißt. Da in dieser Versuchsreihe deutlich niedrigere Bearbeitungsgeschwindigkeiten gewählt wurden, als bei Verwendung der längerbrennweitigen Optik, tritt der bereits beschriebene Humping-Effekt nur in sehr schwacher Form auf.

Da bei allen untersuchten Parameterkombinationen eine Durchschweißung des Substrats erreicht wurde, liefern die Messergebnisse keine Daten über die Abhängigkeit der Nahttiefe h . Die Breite b der wiedererstarteten Schmelze weist hingegen eine deutliche Abhängigkeit von der Bearbeitungsgeschwindigkeit auf. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, das sich auf die Werte aus Tabelle 12 bezieht, lässt die Annahme zu, dass der Zusammenhang der beiden Größen im untersuchten Parameterintervall linear ist. Entgegen der Erwartungen scheint der Einfluss der Laserleistung hingegen weniger bedeutend zu sein, die Schweißnähte weisen bei gleicher Bearbeitungsgeschwindigkeit und variabler Leistung nur geringe Unterschiede in ihrer Breite auf.

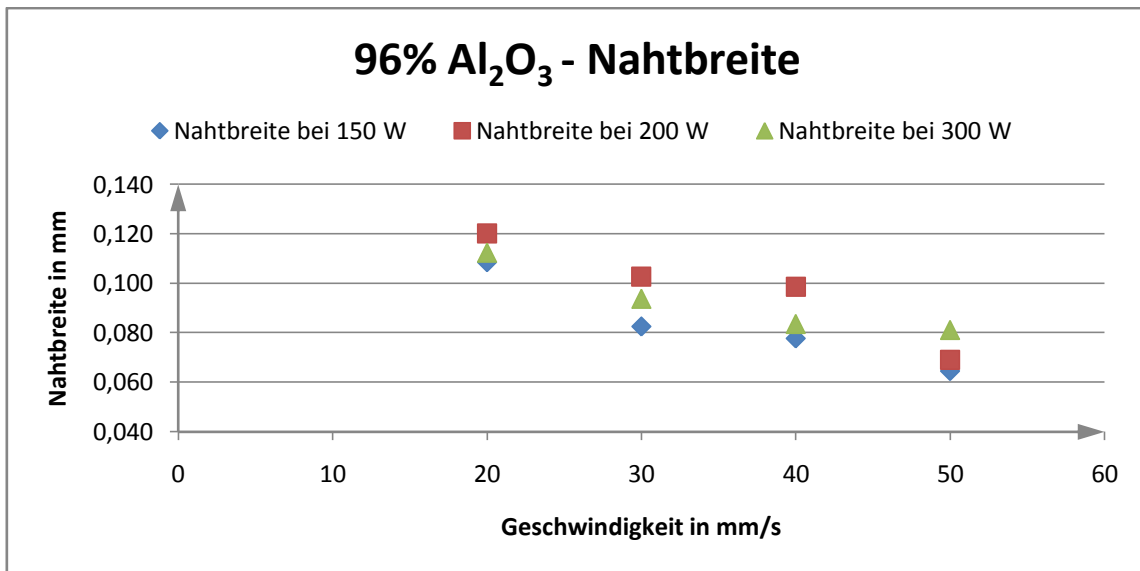


Diagramm 3: Nahtbreite in Abhängigkeit von Leistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit

Obwohl in der Versuchsreihe 2 unter Einsatz der Optik mit 500 mm Brennweite teilweise die gleichen Parameterkombinationen untersucht wurden, wie in dieser Versuchsreihe mit der 230er Optik können die Messwerte aus beiden Reihen nur bedingt verglichen werden. In der Versuchsreihe 2 wurde mit 1,25 Millimetern ein deutlich dickeres Material verwendet, als das laut Herstellerangabe 0,77 mm dicke Substrat, das in Versuchsreihe 4 zum Einsatz kam. Abbildung 24 zeigt zwei unter gleichen Parametern erzeugte Schweißnähte aus den zwei Versuchsreihen in gleicher Vergrößerung. Die unterschiedlichen Substratdicken sind hier auf den ersten Blick erkennbar. Die unterschiedlichen Materialdicken stellen verschiedene Bedingungen bei der Bearbeitung dar. Es muss mehr Material aufgeschmolzen werden und auch die Wärmeleitung unterscheidet sich von der in Versuchsreihe 4. Diese unterschiedlichen Bedingungen lassen einen Vergleich von Messwerten wie Breite der Naht oder Querschnittsfläche der Schweißung nicht zu.

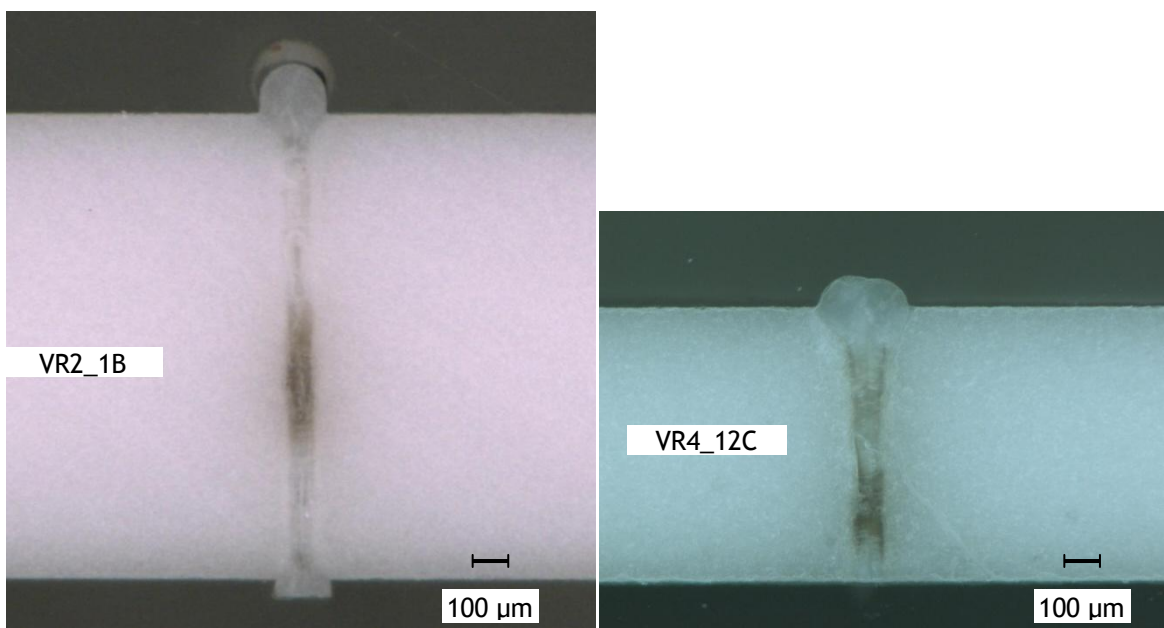


Abbildung 24: Vergleich der Schweißnähte aus VR2 und VR4 bei 300 W und 50 mm/s

Beide Spuren weisen eine Nahtüberhöhung auf, wobei sie bei der linken Schweißnaht deutlicher ausgeprägt ist. Bei beiden Proben sind Inhomogenitäten in der wiedererstarteten Schmelze durch verschiedene Helligkeiten sichtbar. Während sich bei Bild VR2_1B ein Riss in der Mitte der Schweißnaht, zwischen den erstarrten Schmelzfronten, andeutet, beginnt beim rechten Bild ein Riss etwa auf halber Höhe der Naht und verläuft von der Spur weg bis zum Substratboden.

Bei keiner der untersuchten Parameterkombinationen konnte eine rissfreie, homogene Schweißnaht erzeugt werden. Auch wenn sich Bereiche einer Schweißnaht durch günstige Eigenschaften, wie eine gute Substratanbindung oder eine gleichmäßige Struktur, auszeichnen (siehe Abbildung 25), wird die Festigkeit der Schweißnaht beispielsweise durch Risse im Grundmaterial und Hohlräume in der Naht herabgesetzt. Die Blindschweißung im linken Bild der Abbildung 25 besitzt eine gute Substratanbindung und im unteren Drittel der Naht ist die Schmelze zu einem relativ gleichmäßigen Gefüge erstarrt. In oberen Bereich der Schweißnaht erkennt man deutlich die Erstarrungsfronten der Schmelze in Form einer hellen Linie in der Nahtmitte. Während des Abkühlprozesses erstarrt das geschmolzene Aluminiumoxid vom Rand der Schweißnaht zur Mitte hin. In diesem Fall hat sich zwischen den aufeinandertreffenden Erstarrungsfronten keine gleichmäßige Verbindung ergeben. Bei einer Belastung des Substrats kann dies wie eine Sollbruchstelle im Material wirken und zum Versagen der Schweißnaht führen.

Das rechte Bild in Abbildung 25 zeichnet sich durch eine gute Verbindung zwischen Schweißnaht und Substrat aus. Auch die oben beschriebene Linie zwischen den Erstarrungsfronten ist nur schwach ausgeprägt. Allerdings ist bei dieser Blindschweißung ein Hohlraum in Höhe der Nahtmitte zu erkennen. Hohlräume, Ausplatzungen und große Poren im Material führen zu erheblichen Festigkeitseinbußen und sind daher unerwünscht. Die thermisch induzierten Spannungen im Material bauen sich häufig durch Risse im Grundmaterial, also neben der Naht ab, wie es im Bild VR4_2C der Fall ist. Es ist wahrscheinlich, dass die Verbindung unter Belastung an dieser Stelle versagt.

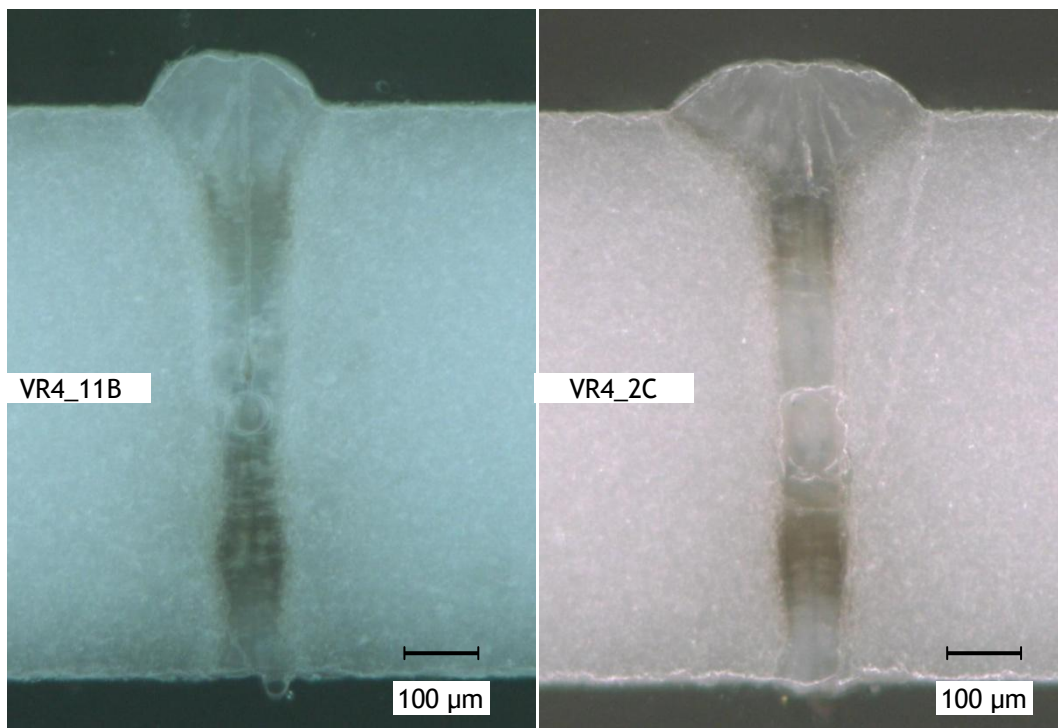


Abbildung 25: Beispiele für teilweise günstige Schweißnähte aus Versuchsreihe 4

In Abbildung 26 sind zwei Beispiele für ungünstige Blindschweißnähte dargestellt. Im linken Bild ist zwischen den Erstarrungsfronten ein deutlicher Spalt erkennbar, der sich im unteren Drittel der Schweißnaht als Riss im Grundmaterial fortsetzt. Im rechten Bild befinden sich mehrere Hohlräume in der Naht, die unter Belastung Ausgangspunkt für Risse sein können, die zum Bruch der Probe führen.

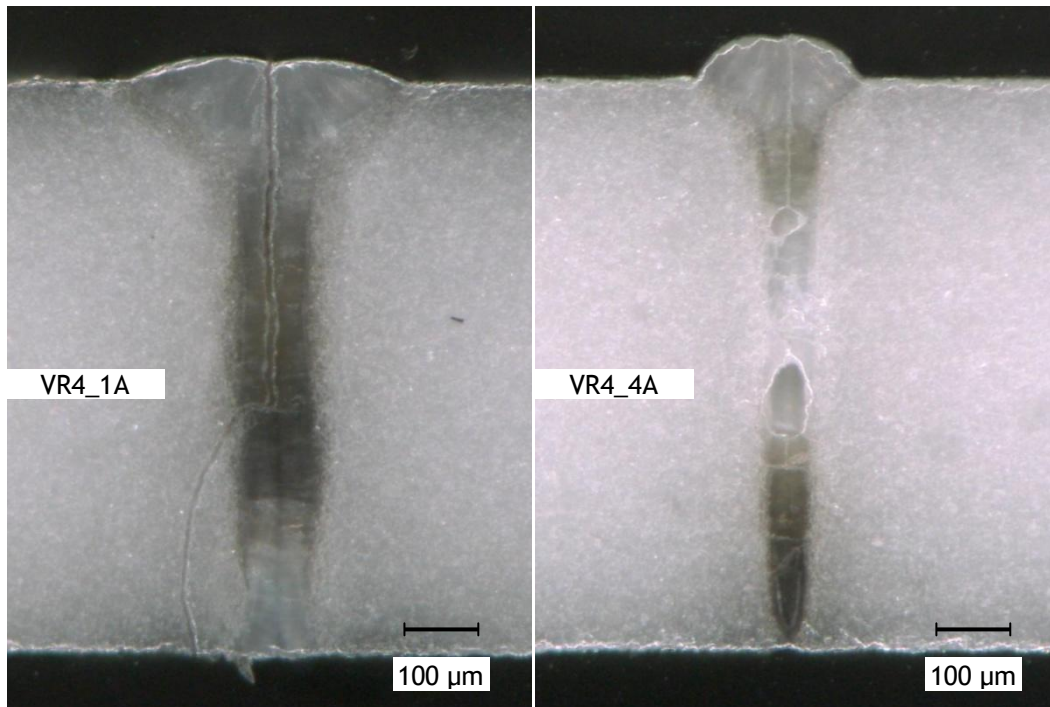


Abbildung 26: Beispiele für ungünstige Schweißnähte aus Versuchsreihe 4

93%ige Al₂O₃-Keramik

In der Versuchsreihe 5 wurde eine Aluminiumoxidkeramik mit einem Reinheitsgrad von 93% untersucht. Laut Hersteller beträgt die Dicke des Substrats 0,63 mm. Es wurden auch hier je drei Blindschweißungen mit der gleichen Parameterkombination gemacht, deren Mittelwerte in Tabelle 13 dargestellt sind. Die vollständigen Messwerte sind der Tabelle 20 im Anhang zu entnehmen.

Nr.	VR5_1	VR5_2	VR5_3	VR5_4	VR5_5	VR5_6
P[W]	80	80	80	80	150	150
v [mm/s]	20	30	40	50	40	50
A [mm ²]	0,041	0,033	0,025	0,018	0,052	0,048
h [mm]	0,507	0,448	0,382	0,314	0,613	0,614
b [mm]	0,066	0,058	0,056	0,051	0,076	0,067

Nr.	VR5_7	VR5_8	VR5_9	VR5_10	VR5_11	VR5_12
P[W]	200	200	300	300	300	300
v [mm/s]	40	50	40	50	75	100
A [mm ²]	0,057	0,050	0,066	0,061	0,052	0,047
h [mm]	0,620	0,612	0,617	0,613	0,604	0,586
b [mm]	0,086	0,072	0,092	0,078	0,074	0,063

Tabelle 13: Mittelwerte der Messungen der Versuchsreihe 5

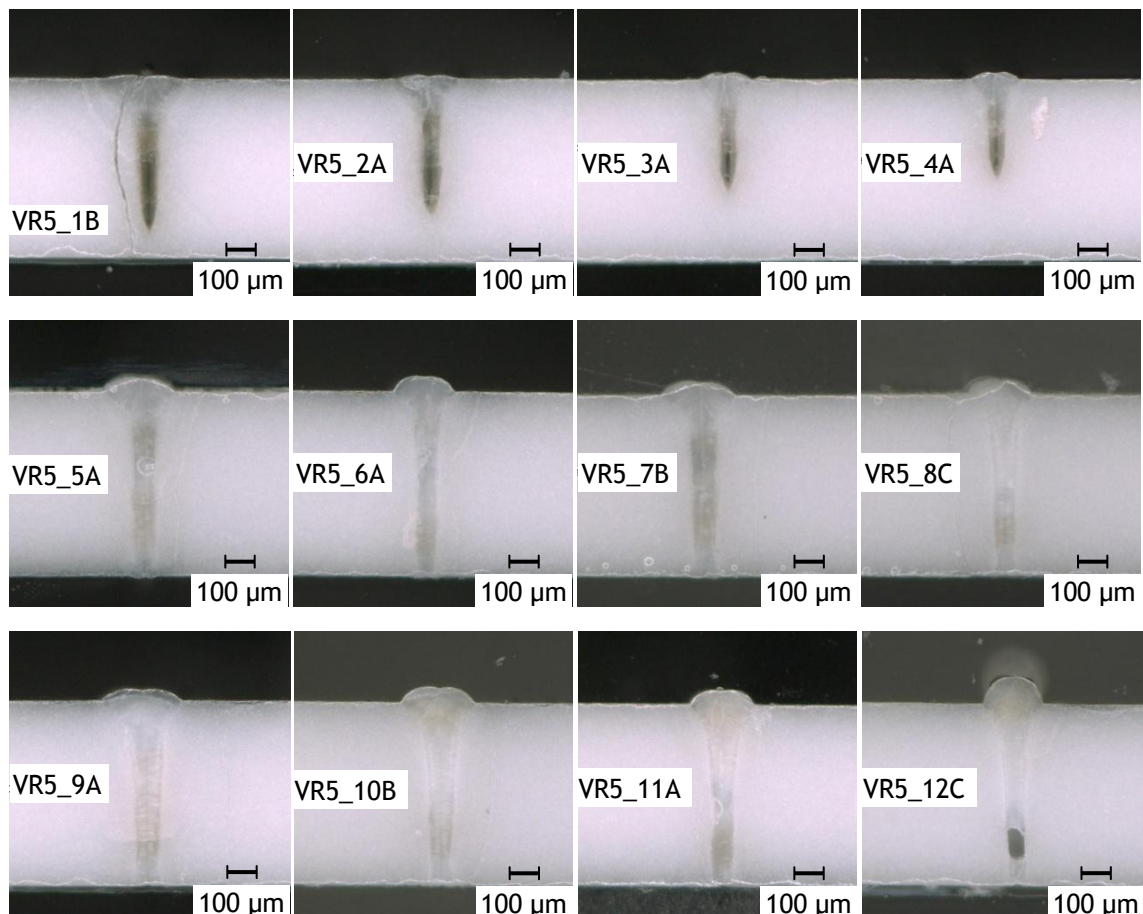


Abbildung 27: Blindschweißungen an 93%iger Al₂O₃-Keramik

Das Leistungsintervall wurde zwischen der minimal einstellbaren Leistung von 80 W und 300 W gewählt. Die obere Leistungsgrenze wurde in vorangegangenen Versuchen als günstig ermittelt, da oberhalb dieser Laserleistung die Intensitäten so hoch sind, dass das Schmelzen des Materials in ein Verdampfen übergeht. Die dabei entstehenden Dampfdrücke schleudern die Schmelze aus der Naht und es wird keine Schweißnaht erzeugt.

Die Bearbeitungsgeschwindigkeiten wurden an die verwendeten Laserleistungen angepasst. Je höher die Leistung, desto höher wurde auch die Geschwindigkeit gewählt, um zu vermeiden, dass ein zu hoher Energieeintrag ins Material stattfindet.

Abbildung 27 zeigt jeweils eine der pro Parameterkombination erzeugten Spuren. Die Bilder der ersten Reihe wurden jeweils bei 80 W und mit steigender Geschwindigkeit von 20 bis 50 mm/s erzeugt. Der Einfluss der Streckenenergie ist hier deutlich erkennbar, da die Einschweißtiefe bei steigender Geschwindigkeit abnimmt. An dieser ersten Bildreihe kann man außerdem erkennen, dass die Nahtüberhöhung bei steigender Bearbeitungsgeschwindigkeit zunimmt.

Die Bilder in der zweiten Reihe der Abbildung 27 zeigen Blindschweißnähte, die mit 150 W bzw. 200 W erzeugt wurden. Die Spuren zeichnen sich dadurch aus, dass eine Durchschweißung des Substrats stattgefunden hat. Die Schweißnähte wirken homogener und gleichmäßiger, als bei den Versuchen mit 96%iger Aluminiumoxidkeramik. Die thermisch induzierten Spannungen im Material haben sich bei den Spuren VR5_5A bis VR5_8C jeweils durch Risse im Grundmaterial neben der Schweißnaht abgebaut.

Die Bilder der letzten Reihe der Abbildung 27 zeigt bei 300 W erzeugte Schweißnähte. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit nimmt dabei von 40 bis 100 mm/s zu. Im Gegensatz zur ersten Bildreihe wird hier der Einfluss der Geschwindigkeit nicht durch die Einschweißtiefe deutlich, da bei allen vier Spuren eine Durchschweißung erreicht wurde. Die Verringerung der Streckenenergie ist in diesem Fall an der Breite der Schweißnähte erkennbar, die mit wachsender Geschwindigkeit abnimmt. Auch hier zeigt sich der Effekt der wachsenden Nahtüberhöhung, bei Bild VR5_12C kann man bereits vom Humping-Effekt sprechen, da schemenhaft im Hintergrund eine kugelförmige, große Nahtüberhöhung erkennbar ist. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist hier demnach bereits außerhalb des idealen Bereichs.

Insgesamt sind die Schweißverbindungen bei Verwendung der 93%igen Keramik deutlich stabiler, die Schweißnähte ähneln in Farbe und Struktur mehr dem Grundmaterial. Ideale Ergebnisse konnten allerdings auch bei diesem Material nicht erreicht werden, obwohl die Qualität der Schweißnähte an sich besser ist, sind die Risse im Substrat kritisch bezüglich der Festigkeit zu beurteilen.

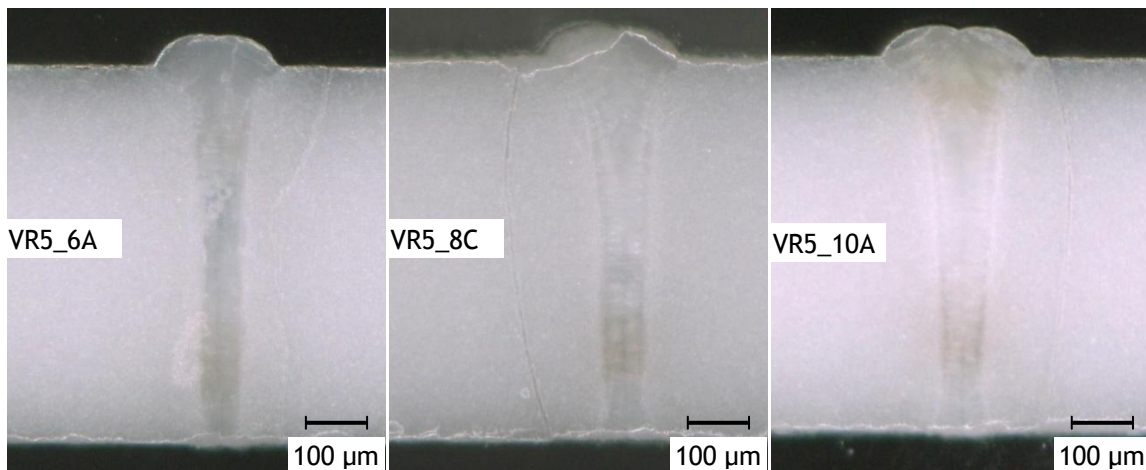


Abbildung 28: Beispiele für teilweise günstige Blindschweißungen aus VR5

Abbildung 28 zeigt einige Schweißnähte, die sich durch eine homogene und gleichmäßig erstarrte Schmelze mit guter Substratanbindung auszeichnen. Einen kritischen Spalt entlang der Erstarrungsfronten wie bei der 96%igen Keramik gibt es hier nicht. Als ideal können diese Schweißnähte dennoch nicht bezeichnet werden, da sich die Spannungen im Material, die durch den Energieeintrag mittels Laser induziert wurden, durch Risse im Grundmaterial abgebaut haben, die die Festigkeit des Substrats stark herab setzen.

5.1.3 Zusammenfassung der Versuchsreihen

Die Untersuchungen an den verschiedenen Al_2O_3 -Keramiken haben gezeigt, dass zwischen der Festigkeit der Schweißverbindung und der Reinheit des Materials eine starke Abhängigkeit besteht. Die hochreine Keramik zerbrach oftmals bereits während der Bearbeitung in viele Einzelteile. Die Festigkeit dieser Schweißungen war so gering, dass sie während der Präparation der Proben, bei der die Substrate in Clip-Halterungen gesteckt werden, bevor sie mit Epoxidharz übergossen werden, zu Bruch gingen.

Bei der 96%igen Al_2O_3 -Keramik kam es nur vereinzelt zu Ausplatzungen und Zerbrechen der Substrate. Als problematisch bei den untersuchten Parameterkombinationen mit diesem Material erwies sich der Erstarrungsvorgang der Schmelze, der vom Rand der Schweißnaht zur Mitte hin gerichtet ist. Im Schweißnahtzentrum, wo die Erstarrungsfronten aufeinander treffen, kam es oft zu keiner stoffschlüssigen Verbindung der Schmelze. Der so entstandene Spalt im Nahtinneren wirkte festigkeitsmindernd und bei Belastung als Sollbruchstelle, entlang der die Schweißnaht versagte.

Die Versuche mit 93%iger Aluminiumoxidkeramik erzielten die Schweißnähte mit der besten Nahtqualität. Die Querschliffe der erzeugten Blindschweißungen wiesen wesentlich weniger Hohlräume und Risse in der Naht auf. Die erstarrte Schmelze ähnelte in Farbe und Struktur dem Grundmaterial und wies eine gute Anbindung an das Substrat auf. Die bereits beschriebenen Risse, die bei dieser Versuchsreihe fast ausschließlich neben der Schweißnaht auftraten, setzen die Festigkeit der Schweißverbindung jedoch erheblich herab, so dass die von der Industrie geforderte Festigkeit von 90% des Ausgangsmaterials nicht erreicht werden kann.

Es konnte bei allen drei Materialarten keine ideale Parameterkombination ermittelt werden, die ein rissfreies Schweißen der Aluminiumoxidkeramik erlaubt. Der durch den Energieeintrag im Material entstehende Temperaturgradient und die damit verbundenen Spannungen im Werkstoff führten stets zur Rissbildung.

5.2 Schweißungen von Winkelgeometrien

5.2.1 Versuchsaufbau

In diesem Teil der Untersuchungen sollten jeweils zwei Keramiksubstrate senkrecht zueinander zu einem Winkel verschweißt werden. Im Vorfeld der Experimente wurde dazu eine geeignete Halterung für die Keramiksubstrate benötigt. Dafür wurde die von Nagel (NAGEL, Diplomarbeit, 1996) in ihrer Arbeit verwendete Schweißvorrichtung modifiziert.

Die Halterung muss in diesem Fall bestimmte Anforderungen erfüllen. Konventionelle Methoden wie Spannbacken oder Klemmhalter führen infolge der Wärmeleitung zu einem Abtransport von Wärme und begünstigen dadurch die Ausbildung von Temperaturgradienten im Material.

Abbildung 29 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Halterung. Die rechteckigen Keramiksubstrate werden auf die beiden Aufleger gelegt. Dafür wurden Keramikplatten in der abgebildeten Geometrie mittels Laser geschnitten und in die Aussparungen der Metallplatte gesteckt. Der Abstand zwischen den Keramik-Aufliegern wurde an die gewünschte Winkellänge von 30 mm angepasst. Da mit verhältnismäßig hohen Leistungen und einem Laser sehr guter Strahlqualität gearbeitet wurde, sollten Rückreflexe an der Metallplatte vermieden werden, daher wurde entlang der Schweißlinie eine weitere Aussparung an der Grundplatte vorgenommen. Während des Schweißprozesses wurde dort zusätzlich ein Stück Keramik untergelegt, da die Streueigenschaften der verwendeten Aluminiumoxidkeramik nahezu ideal sind und dadurch die Gefahr von Rückreflexen weiter minimiert wurde.

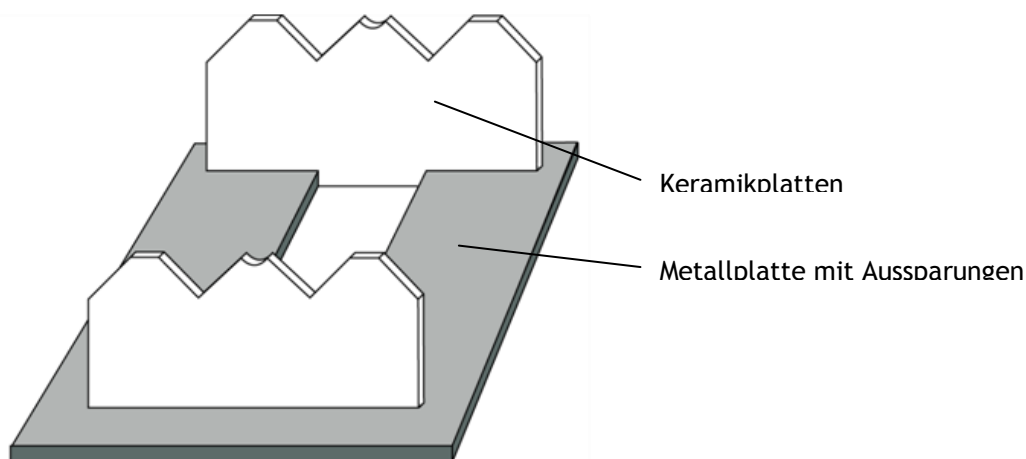


Abbildung 29: Halterung zum Schweißen der Winkelgeometrien

Da jeweils Proben der gleichen Abmessung $10 \times 30 \times 0,63 \text{ mm}^3$ verschweißt werden sollen, müsste die Halterung insofern modifiziert werden, dass eines der Substrate höher liegt, als das andere, damit es zu einer Überlappung kommt. Abbildung 30 zeigt, wie dieses Problem auf einfache Weise durch Unterlegen eines dritten Substrats gelöst wurde.

Die Aufleger wurden aus der gleichen Keramik gefertigt, die für die Herstellung der Proben verwendet wurde, um einen möglichst geringen Wärmeabfluss an den Auflagestellen zu erreichen. Aus diesem Grund wurden die Keramikplatten aus 0,77 mm dickem Material geschnitten, um die Auflagefläche minimal zu halten.

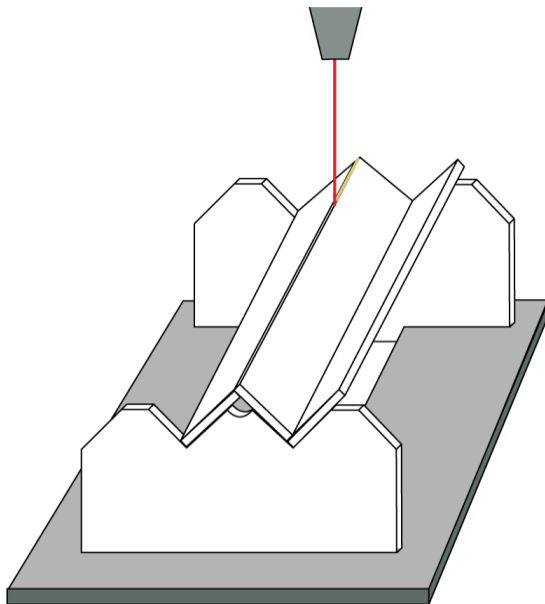


Abbildung 30: Halterung mit aufgelegten Proben

5.2.2 Untersuchte Parameter

Die Versuche zum Schweißen von Winkelgeometrien wurden mit einer Optik mit 230 mm Brennweite durchgeführt. Der Fokusdurchmesser beträgt bei dieser Optik ca. 21 μm . Obwohl die Versuchsreihen zum Blindschweißen ergaben, dass sich ein niedriger Reinheitsgrad günstiger auf die Schweißverbindung auswirkt, wurde für die Proben eine 96%ige Keramik der Dicke 0,63 mm verwendet, da die 93%ige Keramik nur in geringer Anzahl zur Verfügung stand.

Neben der Leistung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit wurde bei diesen Versuchen die Länge der Schweißnaht variiert, um zu ermitteln, ob es bei längeren Schweißnähten zu größeren Spannungen im Material und damit eher zu Rissen oder Versagen der Probe kommt.

Aus diesem Grund wurden neben einer durchgehenden Naht über die gesamte Länge der Proben auch Steppnähte mit kürzeren Schweißnahtstücken erzeugt. Dabei wurde die Nahtlänge zwischen 30 und 5 mm variiert. Die mittels Steppnaht gefügten Teile würden jedoch nicht die Anforderungen für gasdichte Fügestellen erfüllen. Der Versuch Steppnähte mit 1 mm langen Nahtstücken zu erzeugen, war in den untersuchten Geschwindigkeits- und Leistungsintervallen nicht erfolgreich. Die Substrate zersprangen noch während des Bearbeitungsvorgangs.

Da keine genormte Prüfmethode für Winkelgeometrien durchführbar war, wurden die Winkel, bei denen eine Verschweißung zustande kam, für mehrere Tage ruhig gelagert. Oftmals bauen sich Spannungen im Material erst Tage später ab, was Risse, ein Versagen der Schweißverbindung und ein Zerplatzen der Substrate zur Folge haben kann.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht über die Parameterkombinationen, bei denen eine Schweißverbindung zwischen den Substraten erreicht wurde. Bei einer durchgehenden Schweißung, also einer 30 mm langen Naht, wurde nur einmal eine Schweißverbindung erreicht. Eine vollständige Übersicht über alle untersuchten Parameter sind im Anhang in Tabelle 25 dargestellt.

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	Überfahrten n	Schweißung
30	1000	83,33	1	ja
12.5	500	75	1	ja
12.5	300	50	1	ja
12.5	300	25	1	ja
10	300	50	1	ja
10	300	40	1	ja
8	750	100	1	ja
8	500	75	1	ja
8	300	50	1	ja
5	500	50	1	ja
5	300	75	1	ja
5	300	75	2	ja
5	300	50	1	ja
5	300	50	2	ja

Tabelle 14: Übersicht über Parametersätze bei denen Schweißung erreicht wurde

5.2.3 Auswertung der Winkel

Insgesamt wurden 22 Winkelgeometrien mit den in Tabelle 14 dargestellten 14 Parameterkombinationen erzeugt. Nach dem Schweißprozess wurden die erfolgreich verschweißten Winkel ruhig gelagert. Nach zwei Stunden waren alle Winkel noch intakt. Dabei sich, wie bereits erläutert, Spannung oftmals erst Tage nach der Bearbeitung abbauen, wurden die Winkel nach drei Tagen erneut begutachtet. Bei 30% der Winkel hatte die Schweißverbindung innerhalb dieser Zeit versagt.

Bei der Beurteilung der Winkel mit dem bloßen Auge auf Risse und Abplatzungen wurde festgestellt, dass 41% der Winkelgeometrien Risse aufwiesen. Oftmals treten jedoch so feine Risse auf, dass sie mit dem Auge kaum wahrnehmbar sind. Aus diesem Grund wurden die Winkel mit der feindispersiven Flüssigkeit Fuchsin benetzt. Bei Fuchsin handelt es sich um einen roten Triphenylmethan-Farbstoff, der in Wasser gelöst dazu genutzt wird, mit Hilfe der Kapillarität Mikrorisse im Material deutlich zu machen. Danach wurden bei 59% der Winkel Risse detektiert.

Einige Winkel wurden in Epoxidharz eingebettet, geschliffen und poliert, so dass Mikroskopaufnahmen der Querschliffe gemacht werden konnten.

Die Problematik dieser Versuchsreihe lag insbesondere in der Positionierung des Werkstücks zum Laserstrahl, insbesondere da der Fokusbereich des Laserstrahls nur 21 µm beträgt. Die Halterung wurde mit Hilfe des Pilotlasers der Anlage auf dem Bearbeitungstisch ausgerichtet. Obwohl der Pilotlaser zuvor auf den 3kW-Laser justiert wurde, kann auf diese Weise nur mit begrenzter Genauigkeit positioniert werden.

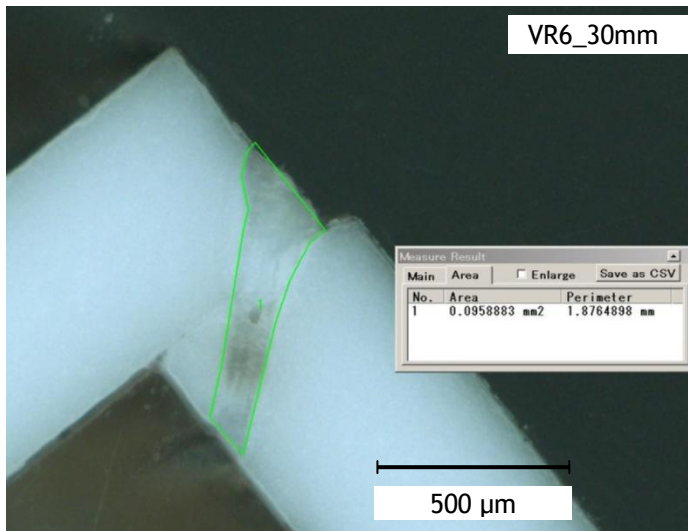


Abbildung 31: Schweißzone bei 30 mm Nahtlänge

Abbildung 31 zeigt die Schweißnaht VR6_30mm mit 30 mm Nahtlänge, die bei 1000 W Leistung und 83,33 mm/s Bearbeitungsgeschwindigkeit erzeugt wurde. Der Versatz der beiden Substrate zeigt, dass auch hier keine optimale Positionierung erreicht wurde. Dennoch wurde eine günstige Verschweißung der Proben erreicht. Der Bereich der erstarrten Schmelze hat eine Fläche von ca. 0,096 mm², ist ca. 110 μ m breit und wurde in der Abbildung umrandet. Aufgrund der wenigen eingebetteten Winkel wurde keine statistische Auswertung von Messwerten durchgeführt.

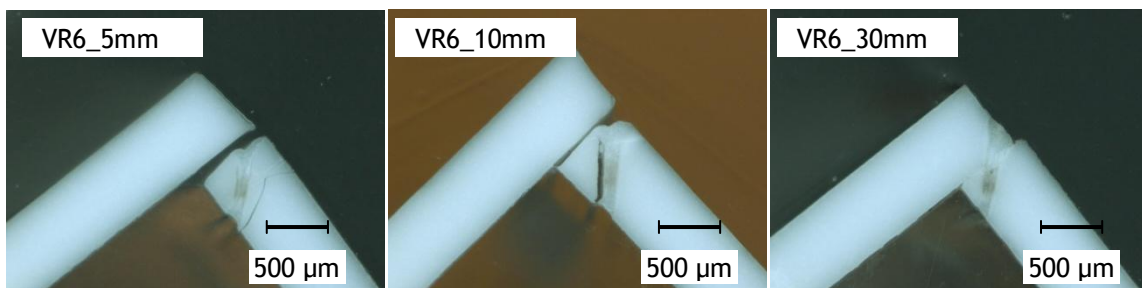
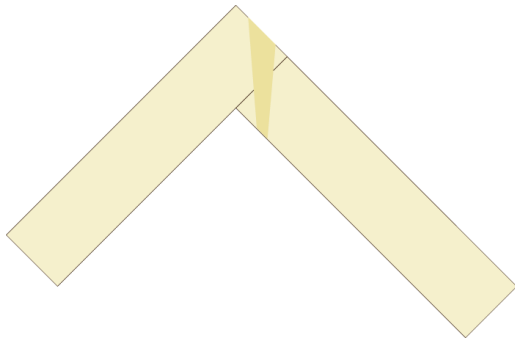


Abbildung 32: Querschliffe von Winkelgeometrien mit 5-, 10- bzw. 30 mm Nahtlänge

In Abbildung 32 sind drei verschiedene Winkelgeometrien im Querschliff dargestellt. Bei allen drei Versuchsobjekten wurde eine Schweißverbindung erzeugt. Die Positionierung der Teile zum Laserstrahl ist beim linken und mittleren Bild nicht optimal gelungen.

Im linken Bild der Abbildung 32 sieht man einen deutlichen Spalt zwischen beiden Substraten, der dadurch verursacht wird, dass die Substrate nicht exakt aufeinander liegen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Kanten der mittels Ritzen und Brechen erzeugten Proben nicht perfekt glatt sind, was auch auf den Bildern zu sehen ist. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Proben an einer Seite bereits verschweißt sind und es durch den Wärmeeintrag und damit verbundene Ausdehnungsprozesse des Materials während der Bearbeitung zu einem wachsenden Spalt zwischen den Substraten kommt. Hinzu kommt, dass die Substrate nur auf den Keramikplatten aufgelegt werden und nicht mittels Einspannungen aneinander gedrückt werden.



Idealerweise sollte kein Spalt zwischen den traten existieren und die Positionierung zum serstrahl so sein, dass die Schmelze einen möglichst großen Bereich beider Keramikteile um- (siehe

Abbildung 33) damit eine größtmögliche Festigkeit der Schweißverbindung gewährleistet wird.

Abbildung 33: Idealer Winkel

Eine mögliche Verbesserung wäre die Nutzung von Keramikblöcken, die von beiden Seiten an die Substrate gelehnt werden (siehe Abbildung 34). Da keine geeigneten Blöcke aus Al_2O_3 -Keramik zur Verfügung standen, wurde diese Variante nicht experimentell getestet. Möglicherweise birgt die Beschwerung auch Probleme, durch die Druckkraft auf die Substrate oder in Folge der Wärmeableitung über die beschwerenden Körper.

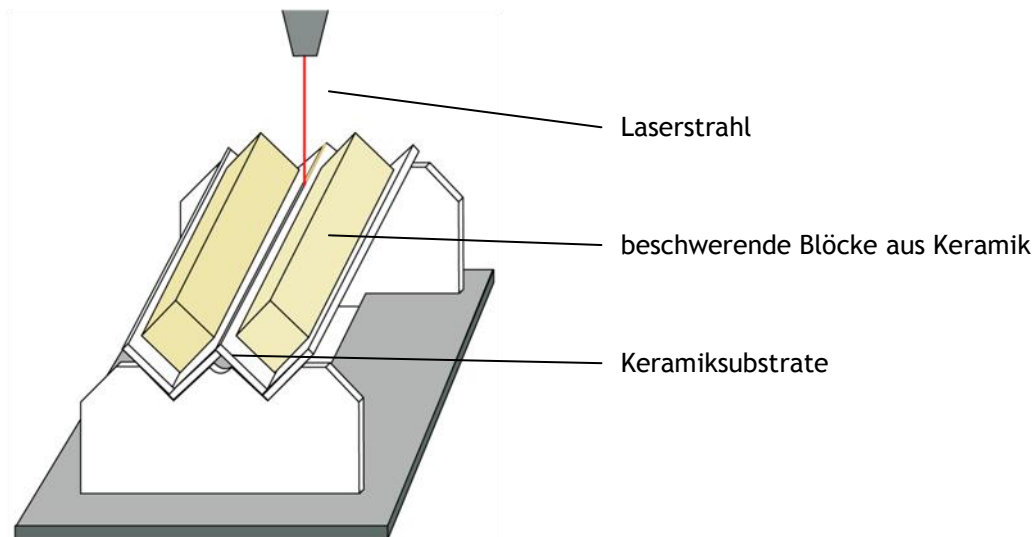


Abbildung 34: Möglichkeit einer Schweißvorrichtung mit beschwerenden Keramikblöcken

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das sogenannte „kalte Schweißen“ von Winkelgeometrien mittels Laser, also ohne Vorheizprozess, prinzipiell möglich ist. Problematisch ist neben der aufwendigen Positionierung der Schweißvorrichtung zum Laser insbesondere die schlechte Reproduzierbarkeit. Im Verlauf der Versuchsreihe wurden alle Parameterkombinationen, bei denen erfolgreich eine Schweißverbindung erzeugt werden konnte, mehrfach wiederholt. Es konnte jedoch kein Parametersatz ermittelt werden, bei dem das Verfahren mit Sicherheit funktioniert, da bei allen Parameterkombinationen viel Ausschuss produziert wurde. Gründe dafür könnten insbesondere bei den zu verschweißenden Probekörpern zu suchen sein. Die Substrate der gewünschten Abmessung wurden mittels Laser aus großen Keramikplatten durch Ritzen und Brechen gewonnen. An der Bruchkante kommt es zur Modifikation des Werkstoffs, die Fläche ist zudem nicht perfekt eben.

Abbildung 35 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Keramiksubstrats, das mittels Laser geritzt und gebrochen wurde. Dabei handelt es sich um die 1,25 mm dicke Keramik mit 96%iger Reinheit. Der Bereich, der durch die Laserstrahlung modifiziert wurde, ist deutlich im oberen Viertel des Substrats zu erkennen.

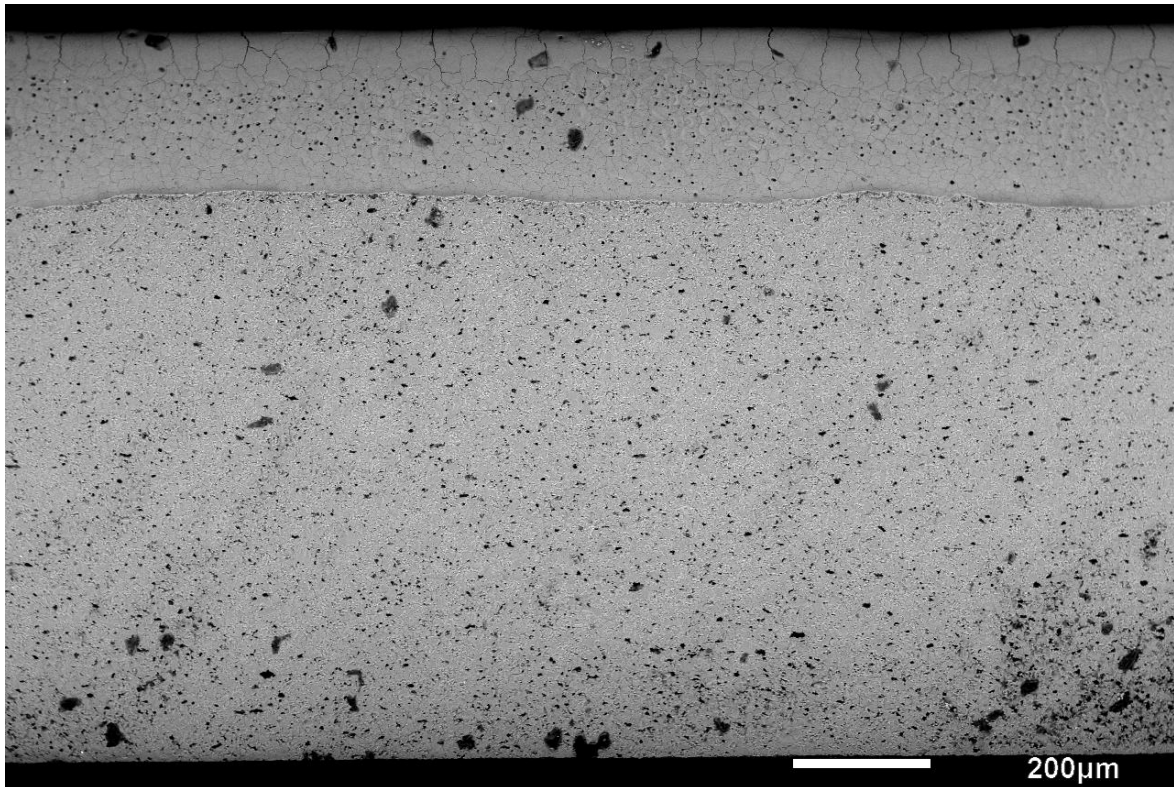


Abbildung 35: REM-Aufnahme eines Laser-geritzten und gebrochenen Keramiksubstrats

Eine Möglichkeit bessere Ergebnisse beim Schweißen von Winkelgeometrien zu erzielen, wäre die Verwendung von geschliffenen und polierten Keramiksubstraten in der gewünschten Größe mit minimaler Oberflächenrauigkeit. Dadurch würde ein optimaler Kontakt zwischen den Substraten gewährleistet werden.

Mit Hilfe einer Wärmebildkamera könnte der Prozess beobachtet und entsprechend optimiert werden, in dem mögliche Wärmesenken an den Auflageflächen konstruktiv minimiert würden. Vielversprechend wären Untersuchungen mit einem Vorheizprozess, bei denen jedoch im Gegensatz zu den Arbeiten von (NAGEL, Diplomarbeit, 1996) nur ein Laser zum Einsatz kommt, indem die Bearbeitungsgeschwindigkeit während des Vorheizprozesses so hoch gewählt wird, dass das Material lediglich erwärmt, aber nicht geschmolzen wird.

Eine weitere Überlegung wäre eine Versuchsreihe im defokussierten Modus, da auf diese Weise ein größerer Strahldurchmesser erreicht würde, der ein größeres Schmelzbadvolumen erzeugen könnte.

Abbildung 36 zeigt zwei Alternativen zu den verwendeten Probengeometrien. Die linke Variante mit angeschrägten Kanten bringt zwar höhere Kosten durch die Vorbereitung der Substrate mit sich, dafür wird aber eine günstige Schweißverbindung ermöglicht. Zudem würden hier Winkel mit gleichlangen Schenkeln erzeugt, ohne dass zwei verschiedene Ausgangsteilgeometrien benötigt werden.

Bei der rechten Variante müssten die Substrate nicht bearbeitet werden, lediglich die Positionierung der Teile zum Laserstrahl ist eine andere als in der Versuchsreihe. Auf diese Weise wird das Schmelzbad genau im Bereich entlang der Kanten erzeugt. Die mit dieser Alternative erzeugten Winkel haben jedoch ebenfalls unterschiedliche Schenkellängen.

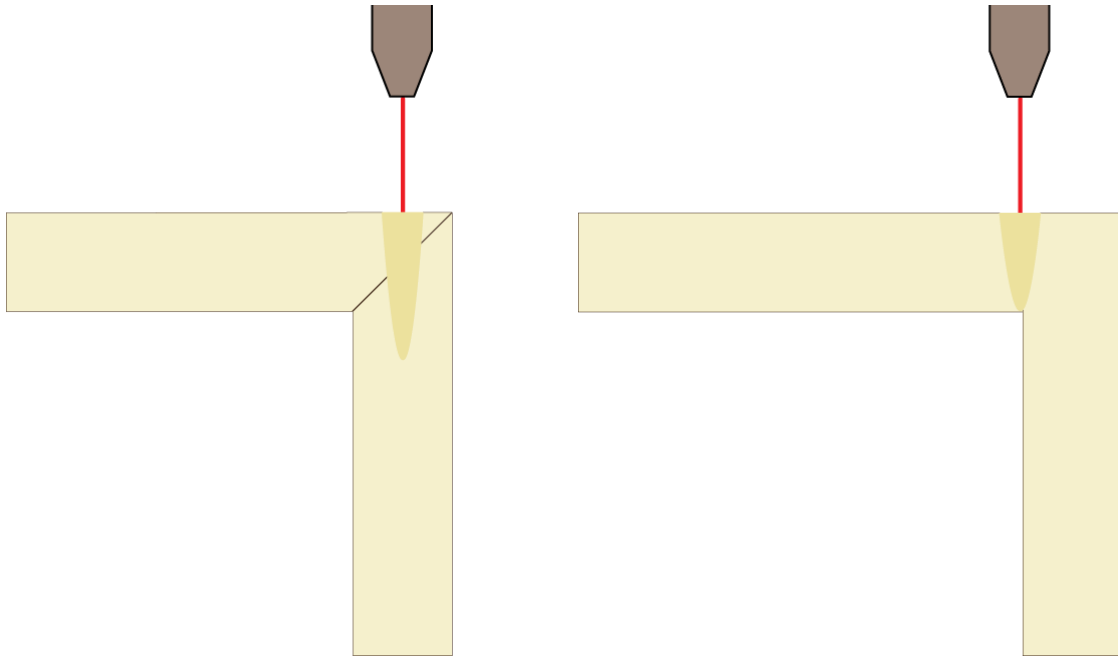


Abbildung 36: Konstruktive Alternativen

5.3 Schweißungen im Stumpfstoß

5.3.1 Versuchsaufbau

In diesem Teil der Arbeit sollten Keramiksubstrate der Abmessung 20 x 25 x 0,77 mm³ im Stumpfstoß verschweißt werden. Auf die dafür konstruierte Schweißvorrichtung für die Halterung der Proben wird im Punkt 0 eingegangen. Für die Substrate wurde trotz besserer Ergebnisse des unreineren Materials beim Blindschweißen die 96%ige Keramik verwendet, da für die Festigkeitsuntersuchungen größere Stückzahlen benötigt werden und die 93%ige Keramik nicht dieser Menge zur Verfügung stand. Da es sich bei der 96%igen Keramik um die in der Technik am häufigsten angewendete Aluminiumoxidkeramik handelt, war vor Beginn der Untersuchung von diesem Material der größte Bestand geordert worden. Für die Festigkeitsuntersuchung der Stumpfnähte muss neben den verschweißten Proben auch eine Anzahl an Substraten getestet werden, die die gleiche Abmessung wie die gefügten Teile besitzen, jedoch aus einem Stück Al₂O₃-Keramik bestehen. Der auf diese Weise ermittelte Festigkeitswert des unbearbeiteten Materials ist notwendig, um die Festigkeit der geschweißten Teile bewerten zu können.

Die gewählte Dicke ist mit 0,77 mm ein Kompromiss, da einerseits eine Durchschweißung erzielt werden soll, aber andererseits die Bauteildicke einen maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung hat. In der Literatur wird bei durchgeschweißten Stumpfstößen die rechnerische Schweißnahtdicke a der Bauteildicke gleichgesetzt. Die Normalspannungen σ_{\perp} , die quer zur Naht-richtung auftreten und somit maßgeblich für Berechnung von Stumpfnähten sind, werden wie folgt berechnet:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_q}{\sum a \cdot l} \quad (4)$$

Die Gleichung gilt für eine durch die Querkraft F allein beanspruchte Schweißverbindung. Dabei ist l die Länge der Schweißnaht.²⁵ Aus dieser Beziehung wird deutlich, dass die Normalspannungen σ_{\perp} mit steigender Bauteildicke kleiner werden, sofern eine Durchschweißung erzielt wird.

Vor der Versuchsreihe wurden die Proben durch Ritzen und Brechen an der Laseranlage hergestellt. Da beim Laserstrahlschweißen besonders hohe Anforderungen an die Naht bestehen, sollten die Substrate vorzugsweise entlang der Kanten verschweißt werden, an denen sie zuvor gebrochen wurden. Auf diese Weise sollte eine optimale Passfähigkeit der Teile zueinander garantiert werden.

Zur Positionierung der Schweißnaht zum Laserstrahl wurde der Pilotlaser durch ein Kamerasystem ersetzt, das eine Justage mit ca. 25 µm Genauigkeit erlaubt.

²⁵ URL: <http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0382-5_l.pdf>, Stand: 09.12.2010

5.3.2 Schweißvorrichtung

5.3.2.1 Konstruktion

Für diesen Teil der Untersuchungen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Schweißvorrichtung konstruiert und gefertigt. Dabei waren bestimmte Anforderungen zu erfüllen, unter anderem eine möglichst kleine Auflagefläche der Proben auf Grund der Wärmeableitung und eine Druckkraft, die die Substrate gegeneinander presst.

Die Vorrichtung wurde mit dem Programm Solid Works konstruiert und anschließend aus Aluminium gefertigt. Wie man in Abbildung 37 erkennen kann, besteht die Halterung aus zwei festen Teilen, die auf eine Grundplatte geschraubt und mit Stiften fixiert wurden. Auf zwei Führungsstangen, die einseitig mit einem Gewinde versehen sind, befindet sich ein bewegliches drittes Teil.

Die Keramiksubstrate werden jeweils auf den Steg aufgelegt und durch die waagrecht wirkende Kraft der Federn aneinander gepresst. Mit Hilfe der Stellmutter kann diese Kraft variiert werden. Die Metallzungen dienen dazu, eine senkrechte Kraft auf die Probenplättchen auszuüben, da diese sich sonst in Folge der waagrecht wirkenden Kraft nach oben drücken. Aufgrund der guten Wärmeleitung von Metall wären Zungen aus Keramik besser geeignet. Die Zungen müssten dann allerdings eine größere Breite besitzen, da der schmale Steg um die Bohrung beim Anziehen der Schrauben zum Bruch der Zungen führte.

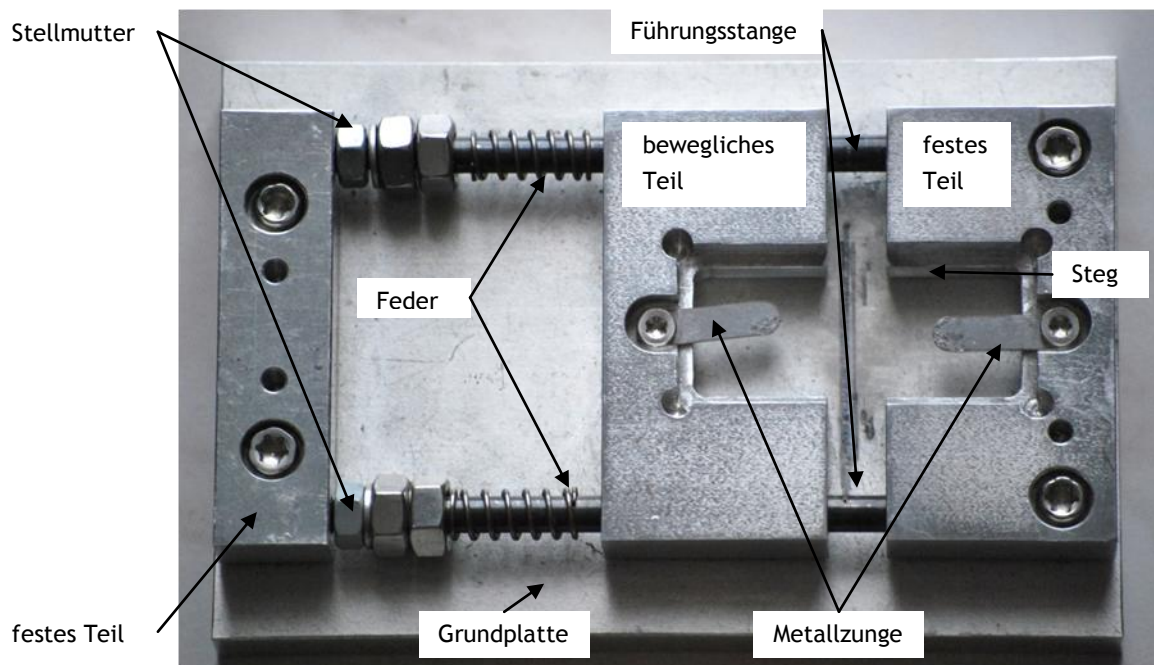


Abbildung 37: Schweißvorrichtung

5.3.2.2 Bewertung

Die konstruierte Schweißvorrichtung eignete sich gut zum Verschweißen der Proben im Stumpfstoß. Durch die Federn wurden die Teile aneinander gepresst, so dass der Fügspalt minimal blieb und die Metallzungen waren lang genug, um die Substrate auf die Stege zu drücken.

Die waagerechte Kraft konnte mit Hilfe der Stellschrauben schnell und einfach variiert werden. Aufwendig waren lediglich die Fixierung und das Lösen der Metallzungen vor und nach jedem Schweißvorgang.

Die Schweißvorrichtung erwies sich als flexibel sowohl gegenüber geringen Abweichungen der Probenlänge als auch -breite. Abbildung 38 zeigt die Abmessungen der Auflagefläche für die Keramiksubstrate. Diese Vorrichtung erlaubt demzufolge das Schweißen aller Proben, die eine Abweichung von $< \pm 2 \text{ mm}$ von der vorgegeben Probenbreite (20 mm) besitzen.

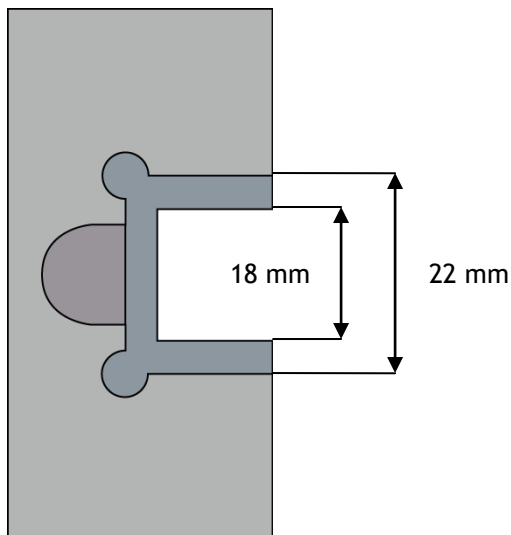


Abbildung 38: Skizze der Auflagefläche

Abweichungen in der Länge der Proben können durch Anpassen des Abstands zwischen festem und beweglichem Teil mit Hilfe der Stellmuttern kompensiert werden.

Die komplette Vorrichtung wurde auf einen in x- und y- Richtung verfahrbaren Werk Tisch gesetzt. Anschläge auf dem Tisch ermöglichten eine schnelle Positionierung nach jedem Probenwechsel.

5.3.3 Untersuchte Parameter

Bei den Untersuchungen zum Stumpfstoßschweißen kam die Optik mit 230 mm Brennweite zum Einsatz. Wie bei den Untersuchungen zuvor wurden Laserleistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit variiert, die Bearbeitung erfolgte in der Fokusslage. Wie bereits in Punkt 5.3.1 erwähnt, erfolgte die Positionierung mit Hilfe eines Kamera-Systems. Die in der Versuchsreihe 7 untersuchten Parameterkombinationen sind in Tabelle 15 dargestellt.

Nr.	P [W]	v [mm/s]	Schweißverbindung
VR7_1	150	20	nein
VR7_2	150	30	nein
VR7_3	200	30	ja
VR7_4	200	20	ja
VR7_5	300	30	nein
VR7_6	300	20	ja
VR7_7	300	40	ja
VR7_8	400	40	ja
VR7_9	400	30	nein
VR7_10	500	50	ja
VR7_11	500	40	nein
VR7_12	500	30	ja
VR7_13	500	20	ja
VR7_14	500	15	ja
VR7_15	1000	500	nein
VR7_16	2000	500	nein

Tabelle 15: Übersicht der untersuchten Parameter zum Stumpfstoßschweißen

Es wurde untersucht, ob ein zusätzliches Absorptionsmittel auf den zu fügenden Kanten einen positiven Einfluss auf das Schweißergebnis hat. Dazu wurden die Parameterkombinationen aus Tabelle 15, die zu einer Schweißverbindung führten, an mit Graphit beschichteten Proben wiederholt, jedoch mit dem Ergebnis, dass keine Schweißverbindung zustande kam und die Substrate in den meisten Fällen zerplatzten. Die erhöhte Absorption führt möglicherweise zu einem größeren Temperaturgradienten und damit zu großen Spannungen im Material. Es wurden aus Zeitgründen keine weiteren Untersuchungen mit zusätzlichen Absorptionsmedien durchgeführt.

Die Festigkeit der erzeugten Schweißverbindungen sollte mittels 4-Punkt-Biegebruch-Versuch ermittelt werden. Beim Prüfversuch an der unter Punkt 4.2.2 beschriebenen Maschine der Firma ZWICK stellte sich jedoch heraus, dass die Festigkeit der gefügten Teile so gering ist, dass keine Messung durchgeführt werden kann. Die Schweißnähte versagten bei so geringen Kräften, dass der Sensor der Prüfmaschine keinen Widerstand detektierte und mit der Prüfung fortfuhr bis der Software-Endschalter erreicht wurde. Da in der Prüfmaschine bereits die empfindlichste, zur Verfügung stehende Messdose mit einem Messbereich zwischen 0,8 und 200 N eingebaut war, konnte keine Festigkeitsprüfung durchgeführt werden.

Die Teile wurden daraufhin von Hand gebrochen, wobei die Probe VR7_14 und VR7_12 am schwersten zu brechen waren.

350 W, 35 mm/s

Da eine Auswertung mittels 4-Punkt-Biegebruch-Versuch nicht durchführbar war, sollten in einer achten Versuchsreihe verschweißte Teile zumindest optisch beurteilt werden. Dazu wurde aus dem Intervall der erfolgreichen Parameterkombinationen der Versuchsreihe 7, die zu einer Verschweißung der Teile führten, ein Mittelwert gebildet, der sich bei 350 W und 35 mm/s ergab.

In Abbildung 39 ist ein Ausschnitt der Naht vor dem Schweißprozess, sowie die Vorder- und Rückseite der Schweißnaht nach der Bearbeitung dargestellt. Messungen an der Naht ergaben eine Spaltbreite, die im Durchschnitt zwischen 40 und 60 μm lag. Im linken Bild der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass die Kanten der Fügepartner nicht optimal glatt sind.

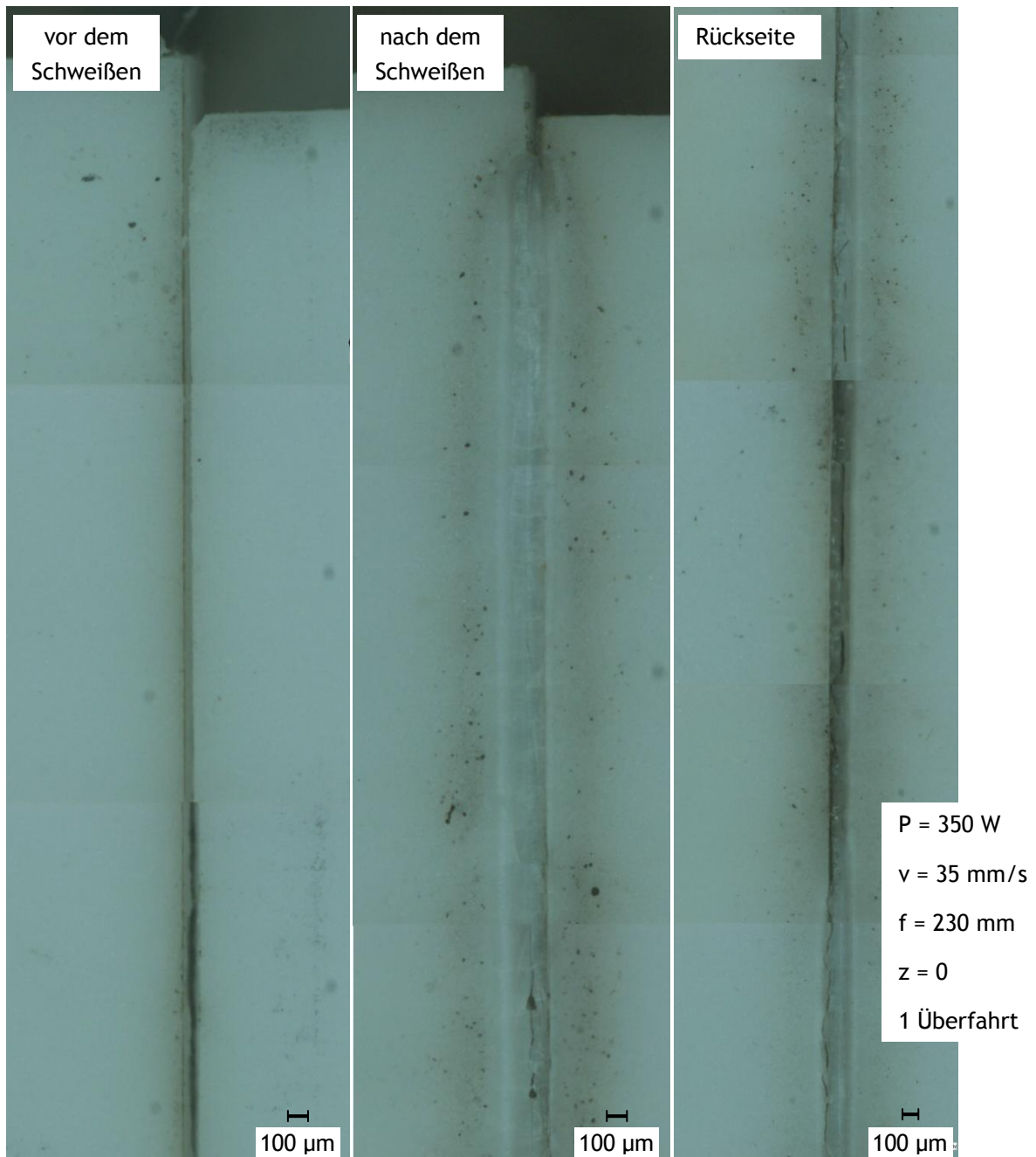


Abbildung 39: Naht vor der Schweißung bzw. Vorder- und Rückseite der Schweißnaht

Das mittlere Bild zeigt die ca. 200 bis 220 μm breite Schweißnaht in der Draufsicht, das rechte Bild zeigt deren Rückseite. Während die Schweißnaht von oben relativ homogen und gleichmäßig erscheint, sind an der Rückseite deutlich Risse entlang der Naht erkennbar.

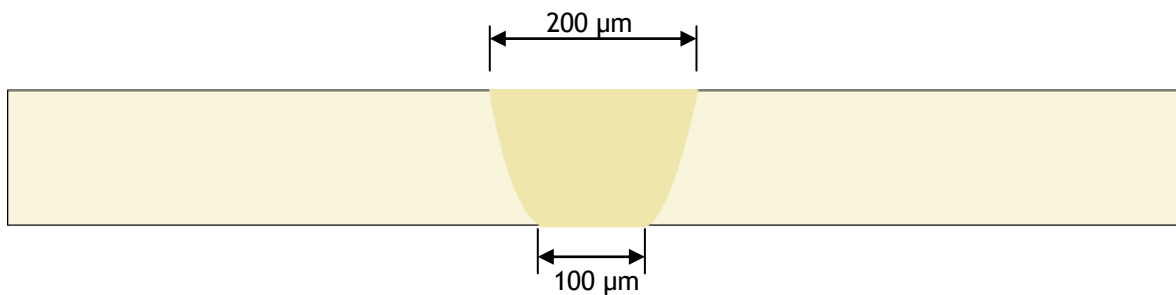


Abbildung 40: Skizze der gefügten Teil, Schnitt quer zur Schweißnaht

Die Skizze in Abbildung 40 stellt das Verhältnis der Schweißnahtbreite an Vorder- und Rückseite der Naht dar. Die Substrate wurden V-förmig verschweißt.

Die gleiche Parameterkombination wurde noch zweimal wiederholt. Dabei wurden die Substrate jeweils erfolgreich gefügt, die Schweißnähte wiesen jedoch stets Risse und Löcher auf (Siehe Abbildung 41).

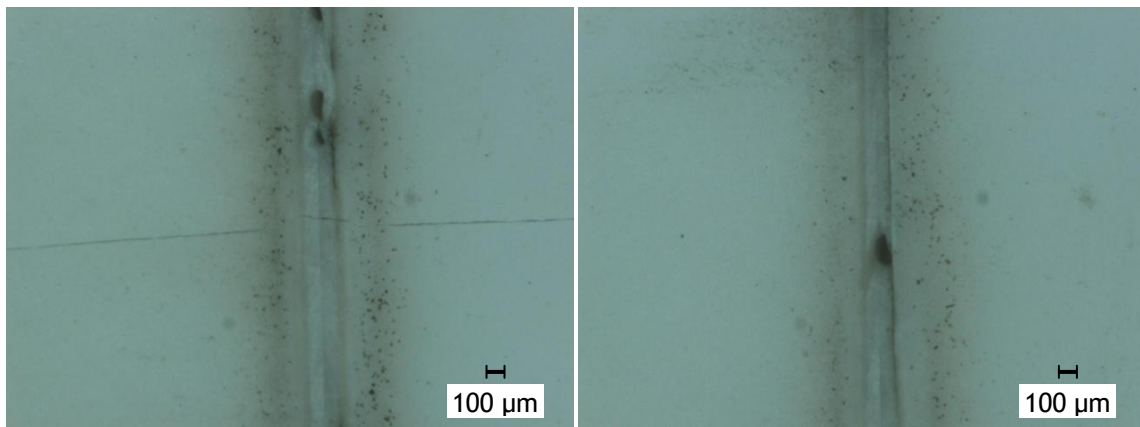


Abbildung 41: Risse und Hohlräume in der Schweißnaht

Aus diesem Grund wurden mit der gleichen Parameterkombination, allerdings 4 mm defokussiert, zwei Substrate im Stumpfstoß verschweißt. Die Vorderseite der Naht war rissfrei und homogen, allerdings wurde keine Durchschweißung erreicht. Die Probe wurde manuell gebrochen, dabei wurde festgestellt, dass die erstarrte Schmelze am Ende der Naht sehr fest am Substrat haftete. Diese Beobachtung wurde bei weiteren Versuchen bestätigt, die Substratanbindung des geschmolzenen Bereichs war am Nahtende stets günstiger, als am Nahtanfang. Mögliche Gründe für dieses Phänomen könnten sein, dass der stetige Energieeintrag zu einem Wärmestau im Material führt, der sich günstig auf die Festigkeit der Naht auswirkt. Auch die Beschleunigungsstrecken des Scanners könnten die Schweißnahteigenschaften beeinflussen, allerdings liefert diese Variante keine Erklärung dafür, dass die bessere Substratanbindung stets am Ende der Schweißnaht stattfindet. Es sollte weiterhin untersucht werden, ob der Laser möglicherweise eine bestimmte Zeit benötigt, bis er stabil läuft, da dies ebenfalls eine höhere Qualität der Schweißnähte zum Nahtende hin erklären würde.

Da sich bei den Untersuchungen zum Einfluss der Nahtlänge im Punkt 5.2.2 kürzere Nahtstücke als weniger anfällig gegenüber Rissbildung heraus gestellt hatten, wurde mit 350 W, 35 mm/s und 4 mm Defokussierung eine Stumpfstoßschweißung mit Steppnaht erzeugt. Dabei wurden die Substrate mit drei jeweils fünf Millimeter langen Schweißnähten gefügt. Es wurde jedoch bei keinem der drei Versuche unter diesen Bedingungen eine Schweißverbindung realisiert. Die Anfangs- und Endpunkte der Nahtstücke dienten als Angriffspunkt für Risse, die quer zur Schweißnaht verliefen.

200 W, 30 mm/s, verschiedene Fokuslagen

Da die Versuche mit 350 W und 35 mm/s keine optimalen Ergebnisse lieferten, wurden für die Versuchsreihe 8 Leistung und Geschwindigkeit auf 200 W und 30 mm/s verringert.

Eine erste Probeschweißung wurde mit Hand gebrochen. Abbildung 42 zeigt eine Draufsicht der gebrochenen Schweißverbindung. Das Substrat ist streckenweise weit neben der Naht gebrochen, was für eine gute Festigkeit der Naht spricht. Das rechte Bild zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus der linken Aufnahme. Hier ist deutlich erkennbar, dass der Bruch im unteren Bereich der Abbildung entlang der Schweißnahtmitte verläuft.

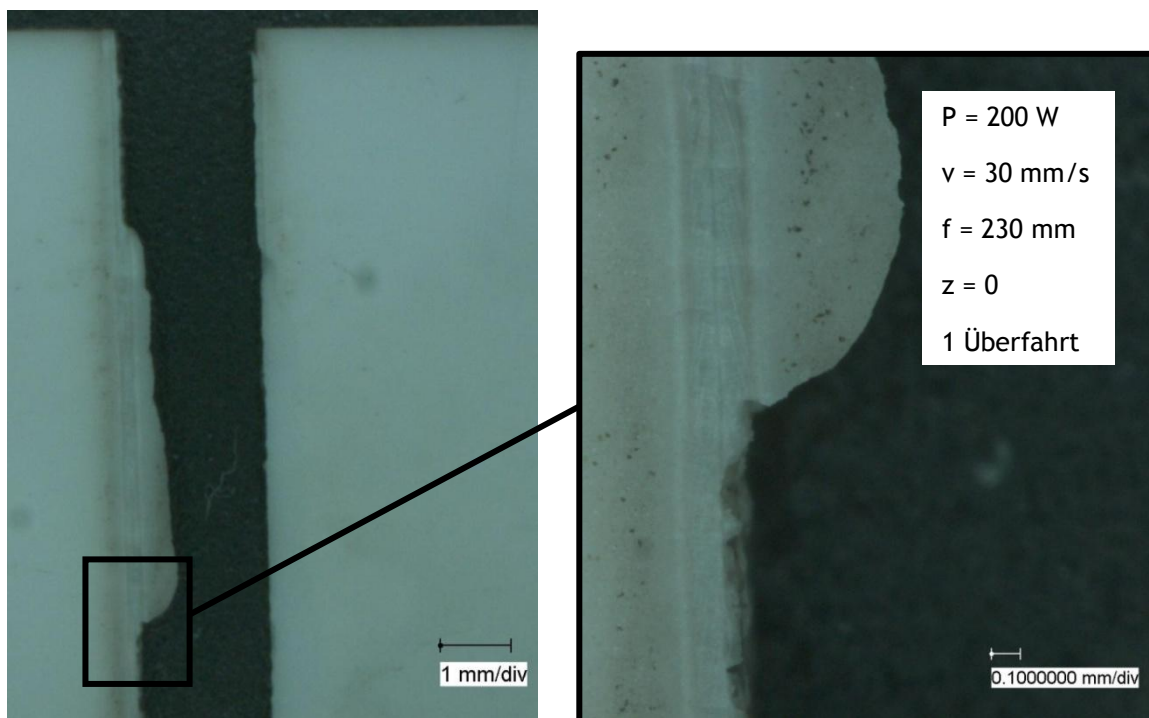


Abbildung 42: Draufsicht auf manuell gebrochene Stumpfstoßschweißung

In Tabelle 16 sind die untersuchten Parameter der Versuchsreihe 8 dargestellt. Leistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit waren bei allen vier Schweißnähten konstant, lediglich die Fokusslage z wurde variiert. Die Spuren VR8_A und VR8_B wurden beide im Fokus bearbeitet. Bei VR8_C und VR8_D wurde die Z-Achse, an der der Scanner samt Optik befestigt ist, um 2,5 mm bzw. 5 mm nach oben verfahren.

Nr.	VR8_A	VR8_B	VR8_C	VR8_D
P [W]	200	200	200	200
v [mm/s]	30	30	30	30
z [mm]	0	0	2,5	5,0
h [mm]	0,763	0,765	0,764	0,762
A [mm ²]	0,112884	0,094224	0,158766	0,087786
b [mm]	0,254	0,138	0,195	-

Tabelle 16: Übersicht der untersuchten Parameterkombinationen in Versuchsreihe 8

Die Proben wurden nicht wie bei den Versuchen zuvor mit Hand gebrochen, stattdessen wurden unter dem Lichtmikroskop Aufnahmen der Schweißnähte in der Draufsicht angefertigt und anschließend wurden die Substrate eingebettet, geschliffen und mittels Reliefpolitur aufbereitet.

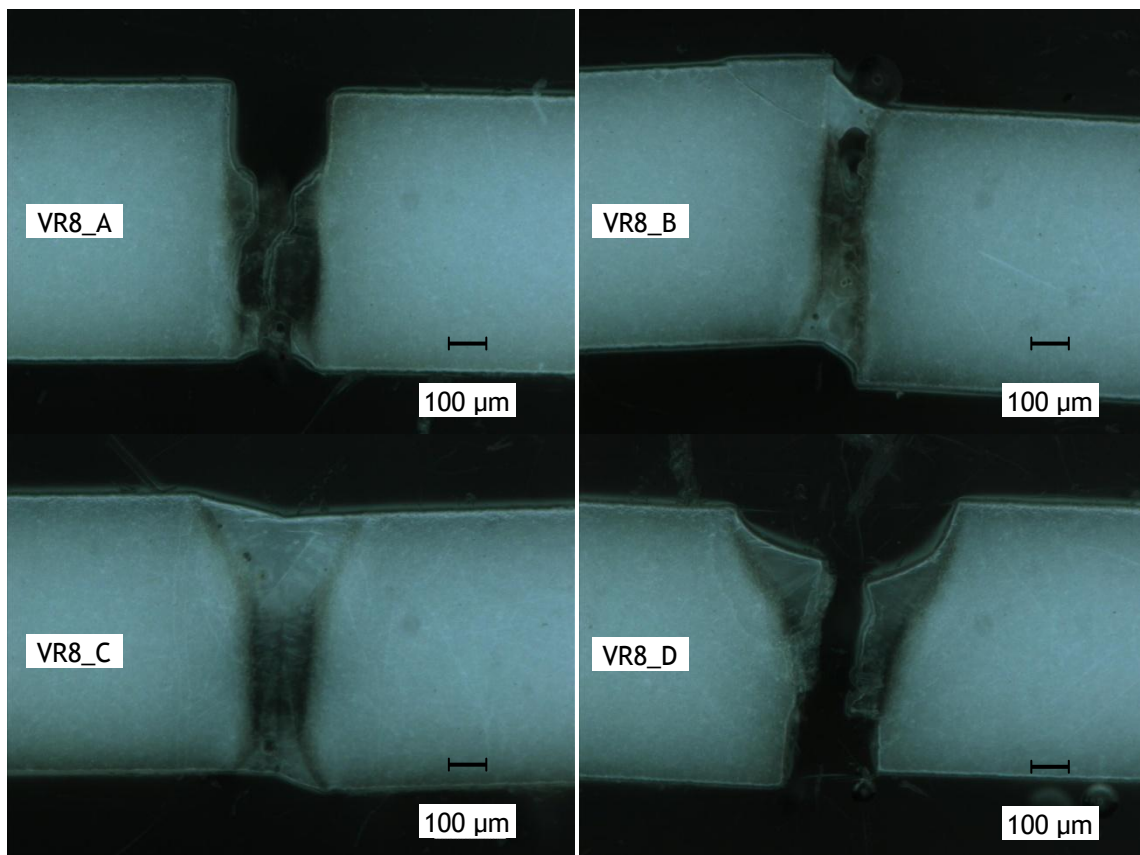
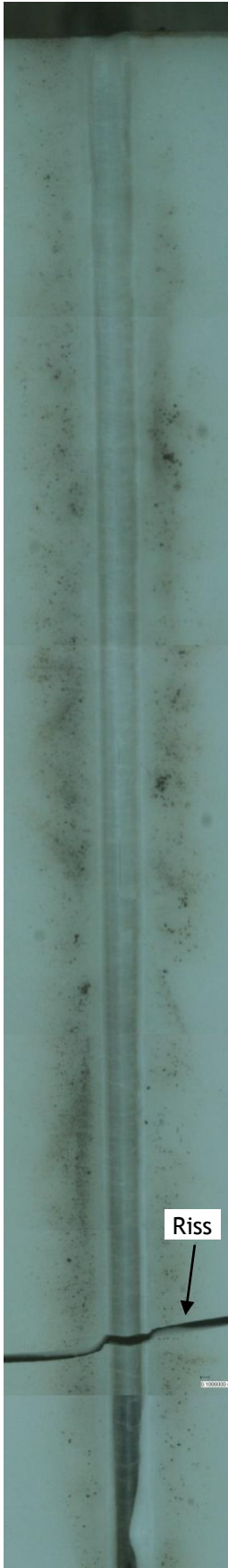


Abbildung 43: Querschliffe der Stumpfstoßschweißungen bei 200 W und 30 mm/s

Abbildung 43 zeigt die Querschliffe der vier Schweißnähte. Bei allen vier Bildern wird die Problematik der Positionierung der Substrate zueinander deutlich. Die Anforderungen an die Nahtvorbereitung sind bei der Bearbeitung in der Fokusslage noch höher, als im defokussierten Modus, da der Strahldurchmesser mit 21 µm im Fokus nur eine begrenzte Spaltüberbrückung erlaubt. Die Schweißnaht mit dem vielversprechendsten Querschliff ist die Probe VR8_C.



Eine Draufsicht der Schweißnaht VR8_C ist in Abbildung 45 dargestellt. Die Breite der Naht schwankt zwischen 300 und 470 μm . Der Bereich links und rechts neben der Schweißung weist Ansammlungen von Poren und eine dunkle Verfärbung auf.

Diese Merkmale waren auch bei den zuvor erzeugten Stumpfstoßschweißungen zu beobachten, jedoch nicht in dieser starken Ausprägung.

In der Abbildung 45 ist außerdem erkennbar, dass das gefügte Teil quer zur Schweißnaht gebrochen ist.

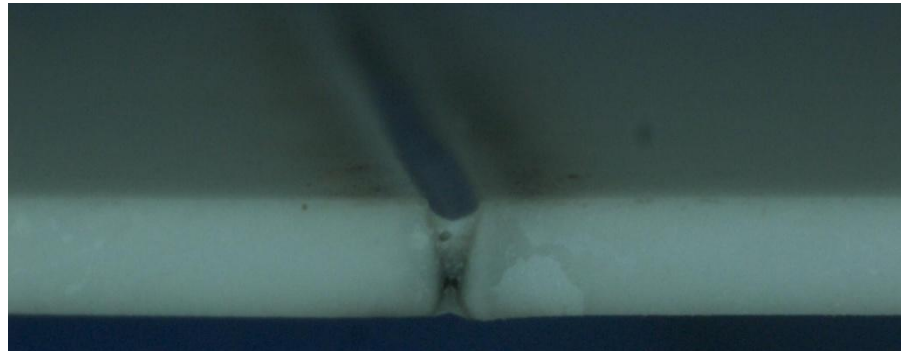


Abbildung 44: Oberer Teil des gefügten Substrats aus der Rissansicht

Abbildung 44 zeigt die Bruchkante und den Querschnitt der Schweißnaht. Da es sich nicht um einen Querschnitt, sondern um einen Bruch handelt, ist die Oberfläche relativ uneben. Dennoch ist gut zu erkennen, dass trotz der Defokussierung eine Durchschweißung des Materials erreicht wurde. Die Schweißnaht verjüngt sich V-förmig zum unteren Drittel des Substrats hin, danach wird die geschmolzene Zone wieder breiter.

Im Gegensatz zu vielen Blindschweißungen weist diese Schweißung keinen Humping-Effekt auf, stattdessen ist hier ein Einfall der Naht zu beobachten. Die dunkle Verfärbung entlang der Naht ist auch auf dieser Abbildung deutlich erkennbar.

Abbildung 45: Schweißnaht bei 2,5 mm Defokussierung

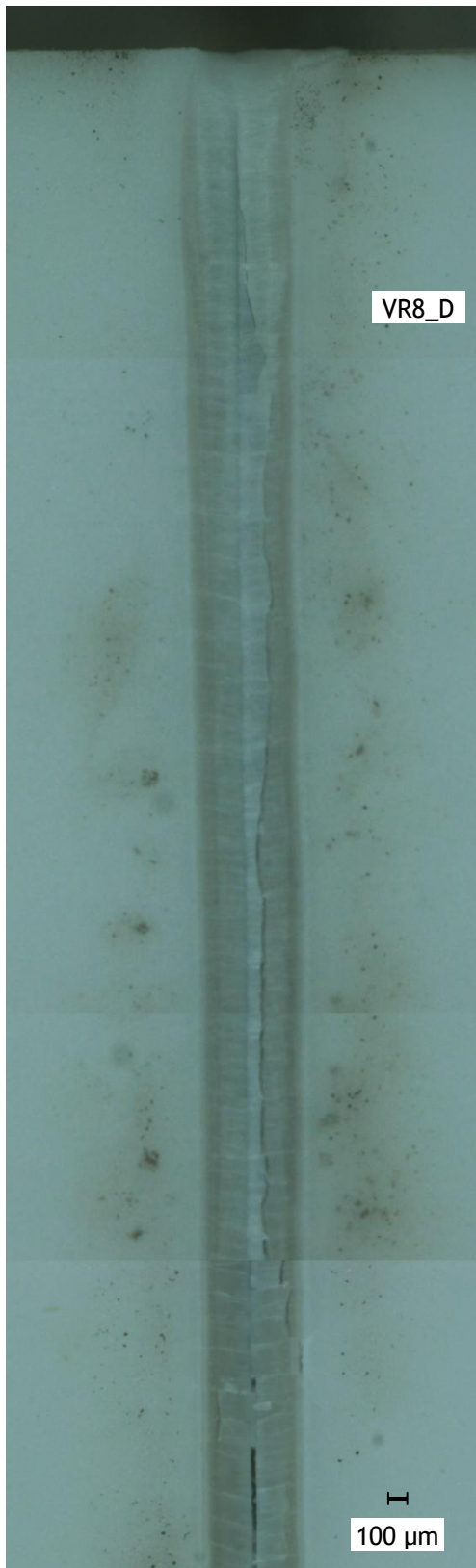


Abbildung 46 zeigt die Schweißnaht VR8_D von oben, die bei einer Defokussierung von fünf Millimetern erzeugt wurde.

Die Schweißnaht ist $515\text{ }\mu\text{m}$ breit. In einem ca. $600\text{ }\mu\text{m}$ breiten Bereich beginnend am Rand der Naht ist das Material dunkel verfärbt und von Poren durchsetzt.

Problematisch bei dieser starken Defokussierung ist, dass nicht zu einer Durchschweißung des Materials kommt. Dadurch sind die gefügten Teil sehr anfällig gegenüber Druckspannungen an der Werkstückunterseite.

Abbildung 46: VR8_D Draufsicht

5.3.4 Auswertung der Schweißnähte

Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine Stumpfstoßschweißverbindungen erzeugt werden, deren Festigkeit den industriellen Ansprüchen genügt. Obwohl einige Parameterkombinationen ermittelt wurden, mit denen Keramiksubstrate erfolgreich gefügt werden konnten, erreichten die Schweißverbindungen nicht die notwendige Festigkeit. Eine statistische Auswertung der Schweißnähte konnte nicht durchgeführt werden, da der Messbereich des verwendeten Kraftaufnehmers mit einem Intervall zwischen 0,8 und 200 N nicht empfindlich genug war, um den Widerstand der Substrate vor dem Bruch zu detektieren.

Als problematisch erwiesen sich weiterhin die Nahtanforderungen. Bei der Bearbeitung im Fokus konnten Spalte, die breiter als 25 µm waren, nicht überbrückt werden. Die Durchführung des Schweißprozesses im defokussierten Modus schafft dabei insofern Abhilfe, dass der Strahldurchmesser auf der Probe größer ist und somit eine größere Toleranz gegenüber der Spaltbreite besteht. Allerdings wird mit Verdopplung der Fläche des Strahlflecks die Intensität halbiert. Das führt dazu, dass ein breiteres Gebiet aufgeschmolzen, aber keine Durchschweißung erreicht wird. Trotz einer guten Qualität der Schweißnaht an der Oberseite sind die Schweißverbindungen dadurch extrem anfällig gegenüber Druckspannungen von der Unterseite, da ein Spalt zwischen den Substraten wie eine Kerbe wirkt (Siehe Abbildung 47).

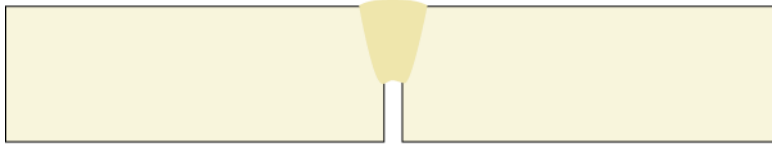


Abbildung 47: Stumpfstoß ohne Durchschweißung

Zu den großen Vorteilen der Laserbearbeitung gehört normalerweise die hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Bei den Versuchen zum Schweißen von Al_2O_3 -Keramik konnten die Ergebnisse nicht reproduziert werden. Erneute Bearbeitungen mit zuvor idealen Parameterkombinationen misslangen und Parameter, die sich zuvor als ungeeignet erwiesen hatten, führten zu einer erfolgreichen Verschweißung. Diese Problematik ist wahrscheinlich in den Eigenschaften des Materials begründet. Da das Festigkeits- und Bruchverhalten von Keramik wie bei allen sprödharten Werkstoffen einer Weibullverteilung folgt, streuen die Ergebnisse stark und es sind große Anzahlen an Versuchen unter gleichen Bedingungen notwendig, um aussagekräftige Schlussfolgerungen ziehen zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das primäre Ziel der Bachelorarbeit, das rissfreie Schweißen von Aluminiumoxidkeramik, wurde nicht erreicht. Im Rahmen der Arbeit wurden Parameterintervalle ermittelt, innerhalb derer Schweißverbindungen erzeugt werden konnten, jedoch nie ohne Risse und nicht mit der geforderten Festigkeit. Die umfassenden Untersuchungen zum Blindschweißen mit Keramik verschiedener Dicken und Reinheitsgrade lieferten dennoch Ergebnisse, die für zukünftige Untersuchungen relevant sein könnten, da einige Parameterkombinationen zumindest teilweise günstige Ergebnisse lieferten.

Fortführende Untersuchungen könnten sowohl den Ansatz der Bearbeitung im defokussierten Modus weiterverfolgen, als auch das Materialspektrum erweitern. Spezielle Keramiken mit guter Temperaturwechselbeständigkeit könnten eine bessere Eignung für den Prozess des Laserstrahlschweißens besitzen. Auch weitere Experimente mit Aluminiumoxidkeramiken niedriger Reinheit wären denkbare Ansätze.

Gezeigt werden konnte, dass das sogenannte „kalte Schweißen“ von Keramik, d. h. ohne Vorheizprozess, prinzipiell möglich ist. Es konnten Teile gefügt werden, ohne dass die Substrate dabei zerplatzt sind. Die Festigkeit der Schweißverbindungen muss jedoch wesentlich erhöht werden, um industriellen Anforderungen zu genügen.

Interessant wären auch Versuche, bei denen die Bearbeitungsgeschwindigkeit in dem Maße erhöht wird, dass der Laserstrahl über das Substrat gescannt werden kann und das Material auf diese Weise vorheizt, bevor im Anschluss daran der Schweißprozess mit demselben Laser stattfindet. Möglicherweise wird durch das Vorheizen vermieden, dass sich ein zu großer Temperaturgradient ausbildet, der Spannungen und Risse im Material verursacht.

Auch wenn das primäre Ziel der Untersuchungen nicht erreicht wurde, liefern die durchgeführten Experimente dennoch eine Basis für weiterführende Arbeiten.

7 Anhang

Ablenkeinheit	SUPERSCAN-SC-30
Eingangsapertur (mm)	30
Strahlversatz (mm)	35,7
Max. Eintauchtiefe für Objektive (mm) ¹⁾	17
Gewicht (ohne Objektiv)	ca. 5,3 kg
Schreibgeschwindigkeit (cps) ^{2,3)}	-
Positioniergeschwindigkeit (m/s) ²⁾	> 6
Positioniergeschwindigkeit (m/s) ²⁾	> 6

1) Ab Auflagefläche Objektivring inkl. 1 mm Sicherheit.

2) Bei Feldgröße 140 mm x140 mm.

3) Zeichensatz 1 mm Höhe, einlinig.

Tabelle 17: Datenblatt des Herstellers II ²⁶

Nr.	VR2_1A	VR2_1B	VR2_1C	VR2_2A	VR2_2B	VR2_2C	VR2_3A	VR2_3B	VR2_3C
P [W]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	50	50	50	75	75	75	100	100	100
A [mm ²]	0,073	0,095	0,081	0,091	0,087	0,091	0,071	0,063	0,057
h [mm]	1,23	1,22	1,23	1,26	1,25	1,24	1,08	1,15	1,12
b [mm]	0,053	0,065	0,077	0,061	0,055	0,055	0,051	0,055	0,061

Nr.	VR2_4A	VR2_4B	VR2_4C	VR2_5A	VR2_5B	VR2_5C	VR2_6A	VR2_6B	VR2_6C
P [W]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	125	125	125	150	150	150	175	175	175
A [mm ²]	0,056	0,054	0,053	0,047	0,045	0,044	0,035	0,040	0,039
h [mm]	0,83	0,86	0,85	0,65	0,63	0,67	0,61	0,58	0,62
b [mm]	0,060	0,048	0,063	0,063	0,065	0,078	0,058	0,073	0,059

Nr.	VR2_7A	VR2_7B	VR2_7C
P [W]	300	300	300
v [mm/s]	200	200	200
A [mm ²]	0,034	0,033	0,033
h [mm]	0,53	0,49	0,48
b [mm]	0,060	0,078	0,078

Tabelle 18: Versuchsreihe 2, vollständige Messergebnisse

Nr.	VR4_1A	VR4_1B	VR4_1C	VR4_2A	VR4_2B	VR4_2C	VR4_3A	VR4_3B	VR4_3C
P [W]	150	150	150	150	150	150	150	150	150
v [mm/s]	20	20	20	30	30	30	40	40	40
A [mm ²]	0,095	0,088	0,093	0,067	0,069	0,070	0,062	0,058	0,059
h [mm]	0,765	0,768	0,758	0,765	0,762	0,757	0,748	0,751	0,753
b [mm]	0,115	0,096	0,115	0,080	0,078	0,089	0,078	0,079	0,076

Nr.	VR4_4A	VR4_4B	VR4_4C	VR4_5A	VR4_5B	VR4_5C	VR4_6A	VR4_6B	VR4_6C
P [W]	150	150	150	200	200	200	200	200	200
v [mm/s]	50	50	50	20	20	20	30	30	30

²⁶ URL: < <http://www.raylase.com/de/produkt.php?n1=2&n2=1&n3=1&n4=2>>, Stand: 01.06.2010

A [mm ²]	0,052	0,057	0,052	0,115	0,104	0,110	0,082	0,075	0,089
h [mm]	0,759	0,752	0,749	0,772	0,766	0,764	0,760	0,750	0,760
b [mm]	0,066	0,068	0,059	0,124	0,112	0,124	0,085	0,091	0,099

Nr.	VR4_7A	VR4_7B	VR4_7C	VR4_8A	VR4_8B	VR4_9A	VR4_9B	VR4_9C
P [W]	200	200	200	200	200	300	300	300
v [mm/s]	40	40	40	50	50	20	20	20
A [mm ²]	0,050	0,050	0,053	0,029	0,065	0,124	0,109	0,116
h [mm]	0,612	0,612	0,606	0,777	0,762	0,751	0,757	0,751
b [mm]	0,074	0,078	0,065	0,031	0,073	0,122	0,100	0,115

Nr.	VR4_10A	VR4_10B	VR4_10C	VR4_11A	VR4_11B	VR4_11C	VR4_12A	VR4_12B	VR4_12C
P [W]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	30	30	30	40	40	40	50	50	50
A [mm ²]	0,080	0,100	0,095	0,065	0,077	0,071	0,076	0,073	0,070
h [mm]	0,770	0,774	0,781	0,764	0,769	0,762	0,772	0,764	0,758
b [mm]	0,082	0,100	0,099	0,082	0,091	0,078	0,087	0,077	0,079

Tabelle 19: Versuchsreihe 4, vollständige Messergebnisse

Nr.	VR5_1A	VR5_1B	VR5_2A	VR5_3A	VR5_3B	VR5_3C	VR5_4A	VR5_4B
P[W]	80	80	80	80	80	80	80	80
v [mm/s]	20	20	30	40	40	40	50	50
A [mm ²]	0,041	0,041	0,033	0,024	0,027	0,023	0,019	0,016
h [mm]	0,497	0,518	0,448	0,366	0,407	0,373	0,336	0,292
b [mm]	0,070	0,061	0,058	0,053	0,060	0,056	0,058	0,043

Nr.	VR5_5A	VR5_5B	VR5_5C	VR5_6A	VR5_6B	VR5_6C
P[W]	150	150	150	150	150	150
v [mm/s]	40	40	40	50	50	50
A [mm ²]	0,050	0,051	0,053	0,045	0,052	0,047
h [mm]	0,605	0,618	0,617	0,615	0,617	0,612
b [mm]	0,070	0,075	0,081	0,067	0,072	0,063

Nr.	VR5_7A	VR5_7B	VR5_7C	VR5_8A	VR5_8B	VR5_8C
P[W]	200	200	200	200	200	200
v [mm/s]	40	40	40	50	50	50
A [mm ²]	0,057	0,055	0,058	0,053	0,048	0,051
h [mm]	0,633	0,615	0,611	0,610	0,610	0,616
b [mm]	0,085	0,088	0,085	0,079	0,060	0,077

Nr.	VR5_9A	VR5_9B	VR5_9C	VR5_10A	VR5_10B	VR5_10C
P[W]	300	300	300	300	300	300
v [mm/s]	40	40	40	50	50	50
A [mm ²]	0,064	0,064	0,068	0,064	0,061	0,060
h [mm]	0,616	0,615	0,618	0,614	0,611	0,614
b [mm]	0,086	0,092	0,099	0,074	0,079	0,080

Nr.	VR5_11A	VR5_11B	VR5_12A	VR5_12B	VR5_12C
P[W]	300	300	300	300	300
v [mm/s]	75	75	100	100	100
A [mm ²]	0,055	0,050	0,044	0,047	0,048
h [mm]	0,604	0,605	0,543	0,608	0,608
b [mm]	0,080	0,068	0,063	0,067	0,060

Tabelle 20: Versuchsreihe 5, vollständige Messergebnisse

P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat ge- platzt
3000	333,33	1	nein	nein	nein	nein
2000	333,33	1	nein	ja	nein	ja
1000	333,33	1	nein	nein	nein	nein
3000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
2000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
1000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
1000	83,33	1	ja	nein	ja	nein
300	75	1	nein	nein	nein	nein
300	50	1	nein	ja	nein	ja

Tabelle 21: Untersuchte Parameter aus Versuchsreihe 6 bei 30 mm Nahtlänge

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat ge- platzt
10	300	50	1	ja	nein	nein	nein
10	300	40	1	ja	nein	nein	nein
12.5	500	75	1	ja	ja	nein	nein
12.5	300	75	1	nein	nein	nein	nein
12.5	300	50	1	ja	ja	nein	nein
12.5	300	25	1	ja	nein	nein	nein

Tabelle 22: Untersuchte Parameter aus Versuchsreihe 6 bei 10 - bzw. 12,5 mm - Steppnaht

P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat ge- platzt
2000	150	1	nein	nein	ja	nein
1000	150	1	nein	nein	nein	nein
750	100	1	ja	nein	nein	nein
500	75	1	ja	nein	nein	nein
300	50	1	ja	nein	nein	nein

Tabelle 23: Untersuchte Parameter aus Versuchsreihe 6 bei 8 mm - Steppnaht

P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat ge- platzt
1000	50	1	nein	ja	nein	nein
500	50	1	ja	nein	nein	nein
300	50	1	ja	nein	nein	nein
300	50	1	ja	nein	nein	nein
300	50	1	nein	ja	nein	nein
300	50	2	ja	ja	nein	nein

Tabelle 24: Untersuchte Parameter aus Versuchsreihe 6 bei 5 mm -Steppnaht

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat geplatzt
30	3000	333,33	1	nein	nein	nein	nein
30	2000	333,33	1	nein	ja	nein	ja
30	1000	333,33	1	nein	nein	nein	nein
30	3000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
30	2000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
30	1000	166,67	1	nein	nein	ja	nein
30	1000	83,33	1	ja	nein	ja	nein
30	300	75	1	nein	nein	nein	nein
30	300	50	1	nein	ja	nein	ja

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat geplatzt
8	2000	150	1	nein	nein	ja	nein
8	1000	150	1	nein	nein	nein	nein
8	750	100	1	ja	nein	nein	nein
8	500	75	1	ja	nein	nein	nein
8	300	50	1	ja	nein	nein	nein

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat geplatzt
5	1000	50	1	nein	ja	nein	nein
5	500	50	1	ja	nein	nein	nein
5	300	75	1	ja	nein	nein	teilweise
5	300	75	2	ja	ja	nein	ja
5	300	50	1	ja	nein	nein	nein
5	300	50	1	ja	nein	nein	nein
5	300	50	1	nein	ja	nein	nein
5	300	50	2	ja	ja	nein	nein
5	250	75	1	ja	ja	nein	nein

l [mm]	P [W]	v [mm/s]	n	Schweißung	Risse	angelaufen	Substrat geplatzt
10	300	50	1	ja	nein	nein	nein
10	300	40	1	ja	nein	nein	nein
12.5	500	75	1	ja	ja	nein	nein
12.5	300	75	1	nein	nein	nein	nein
12.5	300	50	1	ja	ja	nein	nein
12.5	300	25	1	ja	nein	nein	nein

Tabelle 25: Parameterübersicht beim Schweißen von Winkelgeometrien, VR6

8 Literaturverzeichnis

BERGMANN, W. (2003 / 2005). *Werkstofftechnik 1* (5. Ausg.). München / Wien: Carl Hanser Verlag.

BRUKER AXS Microanalysis GmbH. (2008). *Quantax Benutzerhandbuch, Auf energiedispersiver Spektrometrie basierendes Mikroanalyse-System*. Berlin.

COBLE, R. L. (1955). Effect of porosity on thermal stress fracture. *Journal of the American Ceramic Society*.

DIN 51068. (Mai 1976 / 1980). Bestimmung des Widerstandes gegen schroffen Temperaturwechsel; Wasser- bzw. Luftabschreckungsverfahren für feuerfeste Steine.

FRAUNHOFER IWS (Institut für Werkstoff- und Strahltechnik) / FRAUNHOFER IOF (Institut für angewandte Optik und Feinmechanik). (2007). *Spezial: Faserlaser. Laser + Produktion*.

HENNICKE, H. W. (1967). *Zum Begriff Keramik und zur Einteilung keramischer Werkstoffe*. Bericht Deutscher Keramik Gesellschaft.

NAGEL, A.-M. (1999). *Laserstrahlschweißen von Aluminiumoxidkeramik*. Fakultät Maschinenbau. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau.

SALMANG, H. S. (2007). *Keramik* (7. Ausg.). Berlin / Heidelberg: Springer.

SCHAUMBURG, H. (1994). *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik* (1. Ausg.). Stuttgart: B. G. Teubner Stuttgart.

9 Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
α	therm. Ausdehnungskoeffizient	1/K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m K
λ	Wellenlänge	m
ρ	Rohdichte	kg/m ³
σ	Spannung	Pa
A	Absorption	%
A	Fläche	m ²
A	Schweißnahtfläche	mm ²
b	Breite	m
b	halbe Dicke einer Platte	m
b	Breite der Schweißnaht	mm
c	spezifische Wärmekapazität	J/kg K
E	Elastizitätsmodul	Gpa
f	Brennweite	mm
F	Kraft	N
h	Schweißnahttiefe	mm
h	Wärmeübergangszahl	W/m ² K
l	Nahtlänge	mm
n	Anzahl an Überfahrten	dimensionslos
R	erster Wärmespannungsparameter	dimensionslos
R'	zweiter Wärmespannungsparameter	dimensionslos
T	Temperatur	K, °C
v	Bearbeitungsgewwindigkeit	m/s
w_0	Fokusradius	m
w_{vor}	Strahldurchmesser vor der Optik	m
z	Fokuslage	mm

10 Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Unterschrift